HANDBOOK OF INDUSTRIAL ROBOTICS

SHIMON Y. NOF, *Editor*
School of Industrial Engineering
Purdue University
West Lafayette, Indiana

With a Foreword by Isaac Asimov

JOHN WILEY & SONS
New York • Chichester • Brisbane • Toronto • Singapore

Справочник по промышленной робототехнике

Книга 1

Под редакцией Ш. Нофа

Перевод с английского
под редакцией
канд. техн. наук Д.Ф. Миронова



МОСКВА
‹МАШИНОСТРОЕНИЕ›
1989

ББК 32.816я2
С74
УДК 621.865.8(035)=03=20

Переводчики: канд. техн. наук Д. Ф. Миронов, канд. техн. наук В. П. Руковчук, А. А. Миронов, Е. Т. Михеева

Справочник по промышленной робототехнике: В 2-х кн. Кн. 1
С74 /Под ред. Ш. Нофа; Пер. с англ. Д. Ф. Миронова и др.— Машиностроение, 1989.— 480 с.: ил.

ISBN 5-217-00614-5

Справочник, подготовленный профессором Ш. Нофом (США), содержит богатый фактический материал о развитии робототехники в США, ФРГ, Великобритании, Японии, Швеции и Франции. Читателям предлагаются полезные и многочисленные сведения по конструкциям, системам управления и информационному обеспечению роботов, рекомендации по применению роботов в ГПС. В книгу 1 включены темы: перспективы развития, механика, управление, искусственный интеллект, экономические аспекты, анализ робототехнических систем.

Для инженеров и руководителей промышленных предприятий и конструкторских бюро.

С $\frac{2402020000-033}{038(01)-89}$ 33—89 ББК 32.816я2

ISBN 5-217-00614-5 (Кн. 1)
ISBN 5-217-00613-X
ISBN 0-471-89684-5

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Заглядывая в грядущее

В 1939 г., когда мне было 19 лет, я написал свой первый научно-фантастический рассказ о роботах. Слово «робот» появилось всего 18 лет назад — его придумал Карел Чапек для своей пьесы «*R. U. R.*», первое представление которой состоялось в 1921 г. Однако о самих роботах — машинах, способных работать, ни в чем не уступая человеку, — говорили уже не одну тысячу лет.

Во всех мифах, легендах, книгах, созданных за эти тысячелетия, роботы рассматривались только с одной точки зрения — морально-этической. Как правило, в них робот — предмет неумеренной гордости своего создателя, человека, посягнувшего на привилегии демиурга. Вслед за этим, как в любой поучительной истории, следовало неотвратимое возмездие — возгордившийся уничтожался (как правило, руками собственного творения).

Мне надоели все эти истории, и я решил рассказать о роботах, в конструкции которых были бы не только органы, позволяющие им отлично работать, но и «предохранители»; роботах, которые были бы не опаснее для человека, чем, к примеру, токарный станок.

Сочиняя рассказы, я постепенно пришел к определению обязательных для роботов правил поведения. Этими правилами я занимался более 44 лет, рассматривая все более тонкие их следствия (моя последняя книга о роботах, «Рассвет роботов», вышла в октябре 1983 г.). Впервые они были сформулированы в рассказе «Хоровод», напечатанном в мартовском номере журнала «Эстаундинг сайенс фикшн» за 1942 г.

В этом журнале один из персонажей говорит: «Давай начнем с трех фундаментальных правил робототехники...» и далее излагает их. В последующих рассказах я называл их «Тремя законами робототехники», а другие писатели обычно называют их «Тремя законами робототехники Азимова».

Я специально подчеркнул это потому, что, насколько мне известно, именно в этом журнале и на этой странице слово «робототехника» впервые появилось в печати.

Я не хотел придумывать новое слово — я честно предполагал (по аналогии с другими терминами), что «робототехника» — это название науки, занимающейся изучением роботов, их устройства, управления и поведения, и в соответствии с этим использовал его. Только через десятки лет мне стало известно, что этого слова нет ни в одном словаре, и что, по сути дела, я его изобрел.

Наверное, каждый человек может надеяться, что ему повезет в жизни, но вряд ли на свете много людей, которым выпало редкостное счастье увидеть, как их мечты начинают сбываться.

Я с печалью вспоминаю одного своего друга, который не дожил до этого. Всю свою сознательную жизнь Вилли Лей связал с ракетной техникой — он мечтал достигнуть Луны. Двадцатилетним юношей он стал одним из первых ракетчиков в Германии, много лет писал популярные книги о ракетной технике и умер в 1969 г., за шесть недель до старта ракеты, впервые совершившей посадку на Луну.

Мне повезло больше. Я дожил до появления транзистора, был свидетелем бурного развития интегральных схем, вылившегося в создание микропроцессора. Я следил за тем, как Джозеф Энгельбергер (он признался, что мои рассказы пробудили его интерес к робототехнике) создавал компанию «Юнимейшн» и вел ее к разработке и производству первых промышленных роботов. Эти устройства не слишком похожи на человекоподобных роботов из моих произведений, но во многих аспектах они намного сложнее их. Нет никакого сомнения, что разработка человекоподобных роботов, способных, например, видеть и разговаривать, — дело очень далекого будущего.

Я дожил до дня, когда мои Законы воспринимают всерьез и цитируют в научных статьях ученые-робототехники. Даже в популярных книгах на них ссылаются как на нечто общеизвестное. Так что, похоже, я обеспечил себе в истории робототехники место ее основоположника (впрочем, не помышляя об этом).

Я дожил до поклонения — в некотором смысле ко мне относятся как к дедушке робототехники: ко мне, химику по образованию и писателюфантасту по прихоти

судьбы, а ведь я практически ничего не понимаю ни в роботах, ни в компьютерах.

Но после того, как я привык к неожиданному повороту колеса фортуны и уверился в том, что ничего больше меня уже не удивит, жизнь преподнесла мне еще один сюрприз.

Попытаюсь объяснить...

В 1950 г. девять моих рассказов о роботах вышли в одном томе под общим названием «Я, робот» (именно эта книга произвела впечатление на Энгельбергера).

На странице, предшествующей оглавлению, в гордом одиночестве красовались «три закона робототехники»:

1) робот не может причинить вред человеку или своим бездействием допустить, чтобы человеку был причинен вред;

2) робот должен повиноваться командам человека, если эти команды не противоречат первому закону;

3) робот должен заботиться о своей безопасности, пока это не противоречит первому и второму законам.

А ниже — подзаголовок. Он гласил: «Справочник по робототехнике, 56-е издание, 2058 г.».

Невероятно. До тех пор, пока это действительно не произошло, я не верил, что доживу до появления роботов, что мои законы робототехники будут повсюду цитировать. И уж конечно я был уверен, что не увижу даже первого издания такого справочника.

Строго говоря, перед вами справочник по промышленной робототехнике (сегодня, на заре робототехники, именно этому ее аспекту уделяется основное внимание), но я уверен, что развитие конторских и бытовых роботов приведет к необходимости сделать название следующих изданий справочника более общим. Более того, по сегодняшним темпам развития можно предположить, что последующие издания не заставят долго ждать себя. Если очередное издание будет выпускаться в среднем раз в 15 месяцев, то в 2058 г. выйдет именно пятьдесят шестое.

Предугадав так много, хочется заглянуть в будущее еще дальше. Я вижу, как роботы быстро усложняются, становятся все универсальнее и полезнее. Я вижу, как они берут на себя всю слишком простую или чересчур монотонную работу, недостойную приложения человеческого разума. Я вижу, как роботы освобождают человека для творчества, и как человечество удивляется тому, что практически любой может быть в том или ином смысле творцом (как оно уже удивлялось, когда всеобщее образование показало, что высокое искусство чтения и письма доступно каждому, а не только избранным).

Я вижу, как человечество выдвигает в космос и иные миры свои передовые посты — носители двух родственных интеллектов совершенно разной природы: интеллект на основе кремния (роботы), способный с немыслимой скоростью и точностью обрабатывать миллиарды чисел, без устали и ошибок выполнять различную работу, и интеллект на основе углерода (люди), способный с помощью интуиции, вдохновения, воображения решать задачи, недоступные ни одной ЭВМ из-за неполноты исходных данных. Я вижу, как закладываются основы нового, совершенного общества, как люди, которые будут жить в нем, создают новый мир, который сегодня не может нарисовать даже самая безудержная фантазия.

Я вижу, как человек и робот рука об руку идут вперед — быстрее, чем каждый из них шел бы в одиночку. И хотя, увы, до этого мне уже не дожить, я уверен, что наши дети и внуки станут свидетелями этого процесса, а последующие издания этой книги опишут его во всех деталях.

Айзек Азимов

Нью-Йорк, январь 1985 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

В истории развития современных промышленных роботов можно выделить три основных периода. Первый из них, начавшийся в 20-х годах нашего столетия, отмечен созданием ранних концепций и страхом перед чудовищными машинами в облике человека. В 60-х годах вслед за появлением первых промышленных роботов зародился доходящий до насмешек скептицизм, подвергавший сомнению их практическую пригодность. В 80-х годах с развитием и совершенствованием роботов и бесспорным успехом науки и техники во многих областях, основное внимание стал привлекать вопрос: а не заменят ли когда-нибудь роботы всех нас? Такие колебания в отношении к новой технологии на протяжении не очень продолжительных периодов не удивительны. Роботы обладают двумя важнейшими качествами живых организмов: способностью к свободному перемещению и интеллектом. Более того, нельзя не восхищаться их способностью брать на себя опасную, неприятную и отупляющую работу, и выполнять ее точно, неутомимо и безропотно, в точном соответствии с полученным приказом.

Когда в 1940 г. Айзек Азимов сформулировал свои «три закона робототехники», он стремился определить отношения роботов к людям. Сегодня мы больше озабочены определением отношения людей к роботам. Поэтому в первом издании «Справочника по промышленным роботам» я предлагаю добавить к ранее сформулированным еще три закона, образующие вместе с ними «Кодекс робототехники».

Три закона использования роботов

1. Роботы должны заменять людей на опасных работах (и этим оправдываются все затраты).

2. Роботы должны заменять людей на работах, которые люди не хотят делать (и этим также оправдываются все затраты).

3. Роботы должны заменять людей на работах, которые они могут выполнять с меньшими затратами (на первых порах это лишит многих привычных преимуществ, но в конечном итоге все затраты оправдываются так же, как при выполнении двух первых законов).

Огромный и постоянно растущий объем информации о промышленных роботах, а в особенности — принадлежность ее множеству научных дисциплин, создали потребность в настоящем издании. Работа над его подготовкой, начинавшаяся в середине 1982 г., преследовала следующие цели.

1. Собрать воедино современные материалы, подготовленные признанными авторитетами в области исследования, развития и применения роботов с ориентацией на промышленные аспекты. Сейчас это становится особо важно, так как, с одной стороны, активизировалась инженерная деятельность в таких отраслях робототехники, как механика, электрооборудование, применение ЭВМ, а с другой — возникла практическая потребность в промышленных интегрированных роботизированных системах.

2. Предоставить в распоряжение работающих в промышленности инженеров и руководителей современный обзор промышленной робототехники.

3. Предоставить робототехникам-практикам современные технические решения в сфере их деятельности.

4. Собрать в одном издании материал, который мог бы составить основу курса робототехники для студентов и аспирантов.

5. Привлечь к активной деятельности новых энтузиастов робототехники и дать им возможность повысить уровень своих технических знаний.

Для того чтобы достигнуть поставленных целей, в помощь редактору были приглашены видные специалисты, составившие редакционный совет, который определил структуру и содержание справочника. Каждый из них внес существенный вклад в эту работу, и я глубоко признателен им за ценные советы.

Многочисленные авторы настоящего справочника представляют широкий спектр научных дисциплин, определяющих развитие всех сфер робототехники. Каждый из них обладает огромным опытом в своей области. Работая в промышленных фирмах, университетах и правительственных организациях, разбросанных по всему миру,

большинстве случаев они сами разрабо-али и внедрили теории и технические при-мы, о которых пишут в этом справочнике. Каждая его глава независимо рецензиро-алась двумя членами редакционного со-ета и мною. После этого авторами вно-ились изменения. Я имел удовольствие оработать со всеми авторами, и выражаю м признательность за сотрудничество.

Наряду с вышеизложенным, следует от-етить, что любая творческая работа по-обного размаха неизбежно ограничена з-за быстрого развития и совершенствова-ия новой гибкой технологии. Мы пред-риняли все усилия для устранения ошибок учета всей надежной информации, имев-іейся в распоряжении к моменту выхода ниги в свет. Ответственность за оставшие-я пробелы — на моей совести. Я надеюсь, то в последующих изданиях справочник дастся улучшить.

Главы справочника сведены в одиннадцать астей, объединенных общей темой: разви-е промышленных роботов (часть 1), ро-оты как механические системы с встроен-ыми ЭВМ (части 2, 3 и 4), конструкции оботов (части 5 и 6) и пять основных об-астей использования роботов (части с 7 по 1) *. Кроме того, специально для настоя-цего справочника был составлен словарь обототехнических терминов, основой ко-орого послужил материал предшествую-их частей **.

* Перевод справочника выходит в свет в вух книгах: Кн. 1 — части 1—5 и кн. 2 — асти 6—11. — *Прим. редакции.*

** Словарь терминов — в кн. 2. — *Прим. едакции.*

Я хочу принести особую благодарность многим лицам, оказавшим помощь в созда-нии этого справочника. От издательства «Джон Уайли и сыновья»: Т. Р. Постону, редактору отдела справочников, на про-тяжении всей работы направлявшему ме-ня своими квалифицированными советами; Б. Р. Сингху, дотошно проверившему руко-пись, подготовленную Н. Белсон, В. Алдзе-рис и Т. Маркоцца, стойко вынесшим все тяготы процесса подготовки к изданию, К. Джозефу, техническому редактору, Э. Кантиллона, руководившему всем про-цессом подготовки. От института Пэрдью: Дж. Ф. Позе, совместно с другими авто-рами составившему предметный указатель; Д. Шафер, помогавшей мне справиться с корреспонденцией; Э. Фишеру, Х. Лехтману, О. Мэймон, Э. Робинсону, К. Сэллерс и Б. Вильгельму — старшекурсникам, немало потрудившимся над выполнением различ-ных редакторских работ.

Я также весьма признателен коллегам, вдохновлявшим работу над справочником своими многочисленными предложениями: М. Барашу, Т. Саквари, Дж. Дипонио, Э. Ленцу, А. Летцу, Дж. Лу, К. Моди, Р. Паулю, Ч. Розену, Г. Сальвенди, Дж. Сольбергу, Э. Уинстону и Д. Уитни.

В заключение я хочу выразить призна-тельность моей жене Наве, помогавшей мне на всем протяжении работы, моим ро-дителям, доктору Джекобу и Яффе Ново-мяст и моим дочерям, Марии и Жасмин за теплую поддержку.

Шимон Я. Ноф (Новомяст)

Вест Лафайетт, Индиана, май 1985 г.

Часть 1
РАЗВИТИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Глава 1
ИСТОРИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

Дж. Ф. Энгельбергер, фирма «Юнимейшн», г. Денбери, шт. Коннектикут

В начале главы по истории промышлен-ных роботов автор должен отдать должное научной фантастике, с которой, собственно, эта история и началась. В самом деле, даже слова робот и робототехника были придуманы писателями-фантастами. В 1922 г. Карел Чапек подарил миру ро-бота в своей пьесе *«R. U. R.»*, а в начале 1940-х годов Айзек Азимов придумал слово «робототехника» для обозначения той от-расли науки и искусства, которой мы сего-дня занимаемся.

Эти два фантаста далеко разошлись во взглядах. Чапек считал, что роботы обяза-тельно выйдут из повиновения и захватят весь мир. Азимов же встроил в своих робо-тов электронные схемы, гарантирующие «хорошее» поведение. Безусловно, авторы справочника разделяют мнение Азимова. Такое единство взглядов уходит корнями к самым истокам промышленной робото-техники, вся история которой говорит о том, что самые ошеломляющие затраты по-крываются достигнутыми результатами, ко-торые предвещают еще более ошеломляю-щие выгоды.

Но оставим научную фантастику. От-счет времени в истории промышленных ро-ботов можно с большим основанием вести от 1956 г. В этом году Девол воплотил свои мысли о производственной деятельно-сти предприятия и знание современных тех-нологических приемов в инженерную кон-цепцию робота. Патентная заявка на про-граммируемый манипулятор была сделана им в 1954 г., а в 1961 г. он получил па-тент. Этот и последовавшие за ним другие патенты легли в основу конструкции пер-вого промышленного робота.

В том же 1956 г. на одном из коктейлей Девол познакомился с Энгельбергером. На-чалось их сотрудничество, вылившееся в основание фирмы «Юнимейшн». Первые ис-следования потенциального рынка сбыта промышленных роботов также выполнены в 1956 г. — были обследованы 15 автомоби-лестроительных и примерно 20 прочих про-изводственных предприятий.

Досконально выяснив, какие промышлен-ные операции требуют простых, но неудоб-ных и нежелательных для человека дей-ствий, можно было начать проектирование. Вначале были созданы необходимые узлы и устройства, а в 1959 г. появился работаю-щий робот — «Юнимейт». Вскоре после этого он уже мог выполнять функции офи-цианта на очередном коктейле.

К 1961 г. работа по созданию экспери-ментальных роботов позволила сделать сле-дующий шаг — создать промышленный ро-бот, эксплуатировавшийся в производствен-ных условиях на литейном участке заводов фирмы «Дженерал Моторс».

Теперь попробуем вернуться назад на не-которое время и с позиций того дня оце-нить перспективы создаваемых промышлен-ных роботов. В 1968 г. были опубликованы результаты финансировавшегося командо-ванием ВВС исследования под кодовым на-званием проект «Прицел». Выполнявшие его ученые поставили целью определить, что необходимо, чтобы какое-либо нововведе-ние можно было успешно внедрить. В ма-териалах проекта «Прицел» сказано, что для этого необходимы три условия:

должна быть созревшая потребность в предлагаемом нововведении;

должны существовать необходимые тех-нологические приемы и компетентные спе-циалисты в данной области;

должна быть обеспечена соответствую-щая финансовая поддержка.

Для Девола и Энгельбергера было оче-видно, что потребность в промышленных роботах вполне созрела, хотя потребовался не один год, чтобы к этому мнению при-соединилось большинство специалистов. Соответствующая технология существовала, а на предприятиях авиакосмической и электронной промышленности имелись весь-ма компетентные специалисты. Финансовой поддержкой удалось заручиться у фирм «Кондек» и «Пульман».

В 1922 г. и позднее в 1940 г. Чапек и Азимов отмечали потребность в роботах — нудной работы, выполнявшейся на пределе

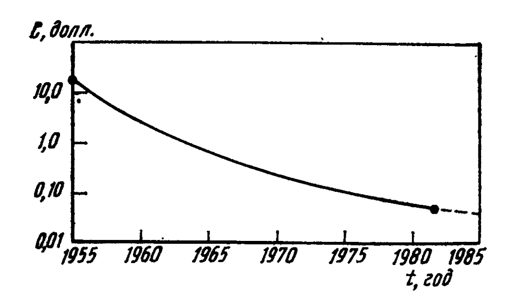


Рис. 1.1

человеческих возможностей, было в достатке и в те времена. Можно было даже добиться финансирования (вспомним Марка Твена, помогавшего изобретателям, носившимся с самыми глупыми проектами). Однако нужной технологии не существовало.

В годы второй мировой войны возникли три новых технологии, и их появление оказало решающее влияние на успех робототехники. Во-первых, была разработана теория сервоуправления. Во-вторых, начался расцвет ЭВМ. В-третьих, успехи физики твердого тела сделали то и другое экономически целесообразным.

Любопытно проследить, как изменилась стоимость выполнения вычислительной операции с момента начала разработки первого устройства управления промышленным роботом. На рис. 1.1 в полулогарифмическом масштабе представлена зависимость этой величины от времени. То, что в 1955 г. стоило 14 долл., к 1982 г. подешевело до 7 центов — более чем в 200 раз. Это обстоятельство позволяет сегодня, приобретая дешевую вычислительную технику, вкладывать большую часть средств в разработку программного обеспечения. В 1956 г. одной из важнейших задач проектирования было обеспечение выполнения необходимых действий с минимальным применением электроники. Одним из удачнейших решений руководства фирмы «Юнимейшн» была ориентация на применение интегральных микросхем в устройствах управления (отметим, что тогда применение вакуумных ламп обошлось бы намного дешевле). В те времена устройство управления станком с числовым программным управлением по пяти степеням подвижности стоило примерно 35000 долл. Инженеры фирмы «Юнимейшн» по праву гордятся тем, что в 1959 г. смогли создать специализированное устройство управления стоимостью всего 7000 долл.

Для первых роботов соотношение затрат на электронные блоки и механику (с гидравлическими устройствами) составляло 75 % к 25 %. Сегодня это соотношение изменилось на обратное.

Следует отметить, что в целом автоматизация производства процветала уже в довоенные годы. Огромные партии изделий выпускались с помощью автоматического оборудования, которое сегодня принято называть специализированным. В 1936 г. вышел на экраны фильм Чарли Чаплина «Новые времена», в котором он сатирическими красками нарисовал человека, из последних сил мечущегося среди промышленных автоматов. Однако все управление этой автоматикой осуществлялось механическими устройствами. По иронии судьбы, слово робот стало сейчас настолько престижным, что на многих фирмах и даже в некоторых странах подобная техника включается в классификацию роботов. В Японии признают право на существование роботов с фиксированной последовательностью движений, составляющих бо́льшую часть японского парка роботов, игнорируя то обстоятельство, что технологически и концептуально — это выходцы из 19 века (более подробно о роли Японии в истории промышленной робототехники сказано ниже).

В 1961 г. был введен в эксплуатацию первый промышленный робот. С этого момента на горизонте фирмы «Юнимейшн» появились грозовые тучи, которые клубились там до 1975 г., когда производство роботов стало приносить реальную прибыль. Первый промышленный робот стал широко известен, его появление повлекло за собой многочисленные и безуспешные усилия конкурентов. Однако те, кто платил деньги, были недовольны слишком медленным прогрессом. Подумать только, первый робот уже давно и отлично работал! Сейчас он находится в Смитсоновском институте. Некоторые из его собратьев работают до сих пор. Многие из них имеют более 100 000 часов «рабочего стажа», что соответствует более чем 50 человеко-годам работы. Концепция доказала свою жизнеспособность, так же как и изделие. Почему же путь к признанию, обеспечившему роботам экономическую жизнеспособность, был таким долгим?

Дело в том, что промышленное производство — весьма консервативная отрасль человеческой деятельности. Поменять в ней что-либо непросто. Хуже того, оказалось, что роботы никому ие нужны! Все, что может делать робот, может делать и человек. Единственное, чем робот может заинтересовать — более низкая стоимость выполнения той или иной работы. Но и это обстоятельство не играет решающей роли, если конкуренты не будут использовать роботы. Такое стечение обстоятельств казалось непреодолимым.

Обратимся к Японии. Начиная с 1960 г. в фирму «Юнимейшн» зачастили японские представители, а в 1967 г. Энгельбергера пригласили сделать доклад в Токио. Если в США привлечь внимание руководителей промышленности не удавалось, то в Токио зал был переполнен: интерес к докладу проявили более 700 промышленников и специалистов. Заключительная дискуссия продолжалась более трех часов. В 1968 г. фирма «Кавасаки Хеви Индастриз» закупила лицензию на всю технологию, разработанную фирмой «Юнимейшн», а к 1971 г. лихорадка распространилась и была образована первая ассоциация по роботам — не в США, а в Японии. Японская ассоциация по промышленным роботам в момент создания включала в себя 46 промышленных фирм и специалистов, пользующихся репутацией в промышленных кругах. Ее первым председателем стал Андо, вице-президент фирмы «Кавасаки», располагавшей к тому времени капиталом в три миллиарда долларов.

Волей-неволей и другим представителям промышленного мира пришлось проявлять активность. Американский институт робототехники был основан только в 1975 г., спустя пять лет после Первого Международного симпозиума по промышленным роботам, состоявшемся в г. Чикаго в 1970 г. Первый симпозиум собрал 125 представителей. К моменту выхода настоящего справочника станет историей уже Тринадцатый Международный симпозиум, на котором ожидается более 1200 представителей, не говоря уже о предполагаемых 25 000 посетителей выставки.

Пожалуй, сегодня можно сказать, что организационная работа завершена. Помимо японских корпораций в число промышленных гигантов, выпускающих промышленные роботы, входят американские фирмы «Дженерал Моторс», «Дженерал Электрик», «Вестингауз», ИБМ, «Юнайтед Текнолоджиз»; крупнейшие фирмы Европы: «Дженерал Электрик» в Великобритании, «Сименс» в ФРГ, «Рено» во Франции, «Фиат» в Италии. А более мелким фирмам, разнообразящим рынок промышленных роботов и специализирующимся на производстве различного оборудования, специализированных роботов, консультациях и проектных работах, вообще нет числа.

Правительства практически всех ведущих промышленных государств объявили, что робототехника входит в круг их национальных интересов, и стремятся всячески активизировать деятельность, связанную с ней. Итак, развитие робототехники достигло апогея. А так ли это на самом деле? Из огромного числа фирм, связанных с ней, лишь единицы приносят прибыль. Подобное развертывание боевых порядков беспрецедентно в истории техники. Кроме того, оно происходит в условиях, когда еще ни одной фирме не удалось добиться очень больших коммерческих результатов.

Промышленная технология не слишком сильно изменилась за последние 20 лет. Ни одна из потенциальных областей применения роботов даже не приблизилась к насыщению ими. В табл. 1.1 перечислены области, известные уже давно, но до сих пор предоставляющие широчайшие возможности для применения роботов. Не нужно много воображения, чтобы, перешагнув через ограничения сегодняшней промышленной технологии (например, введя в состав робота элементарную зрительную систему или скромных возможностей тактильные датчики), подойти к решению задач другого класса (их перечень приведен в табл. 1.2).

1.1. Традиционные области применения роботов

Литье в постоянные формы
Точечная сварка
Манипулирование стеклянными изделиями
Закалочные операции
Кузнечно-прессовые операции
Окраска распылением
Обслуживание станков
Штамповочные операции
Литье пластмасс
Литье по выплавляемым моделям
Обслуживание транспортеров
Загрузка и разгрузка палет
Технический контроль

1.2. Перспективные области применения роботов

Мелкосерийная сборка
Проводной монтаж, прокладка жгутов
Упаковка
Работа с текстильными заготовками
Медицинские лабораторные анализы
Обрубка отливок

1.3. Более отдаленные перспективы применения роботов

Уборка мусора
Быстрое приготовление и подача пищи
Заправка автомобилей топливом
Скотоводство, птицеводство
Обслуживание и дезактивация ядерных установок
Обслуживание больных
Протезирование
Нейрохирургия
Домашнее хозяйство

Те же задачи робототехники, которые не примыкают вплотную к промышленному производству, пока еще с трудом просматриваются. Некоторые из них приведены в табл. 1.3.

Мне значительно повезло в жизни: удалось присутствовать при рождении отрасли промышленности, быть свидетелем ее юности, размышлять о тех великолепных перспективах, которые ожидают робототехнику в пору зрелости. Справочник по промышленной робототехнике, по крайней мере, до конца нашего столетия должен постоянно обновляться, освещая все новые ее достижения.

Я желаю редакторам этого издания здоровья, долгих лет жизни и творческой активности.

Глава 2
РОЛЬ РОБОТОВ В АВТОМАТИЗАЦИИ

Ч. Ф. Картер, фирма «Цинциннати Милакрон», г. Цинциннати, шт. Огайо

2.1. Некоторые перспективы промышленной автоматизации

Что заставляет заниматься автоматизацией? Как правило, одна из трех основных причин:

энергетические затраты или условия выполнения той или иной работы неприемлемы для человека;

выполнение какой-либо операции вручную не обеспечивает требуемого качества продукта;

потребность в выпускаемом продукте настолько велика, что становится выгодным внедрение более совершенных методов производства.

Есть еще одна причина, имеющая второстепенное значение: наличие новой технологии, в принципе пригодной для решения тех или иных задач.

Рассматривая основные области применения роботов, нетрудно убедиться, что их внедрение побуждается всеми перечисленными причинами. Более того, само появление роботов стало возможным только благодаря развитию технологии применения ЭВМ.

Если рассматривать робототехнику как совокупность технологических приемов, и пользоваться предложенной Нейсбиттом концепцией трех этапов развития технологии [1], можно лучше понять значимость роботизации. По Нейсбитту, на первом этапе развития любая технология находит применение в решении довольно скромных производственных задач. Впрочем, их успешное решение повышает вероятность дальнейшего развития этой технологии. Применительно к робототехнике с этим этапом связаны применение роботов для сварки, перемещения раскаленных заготовок и тяжелых предметов, их работа в горячих цехах и на участках с агрессивной средой. Первый этап тесно связан с первой из указанных причин, побуждающих автоматизацию.

На втором этапе уже найденные приемы и методы совершенствуются. Многие рамки традиционного производства становятся стесняющими. Для того чтобы реализовать все потенциальные плюсы технологии, требуются организационные изменения. В наши дни робототехника вступает в этот этап своего развития, и, как мы далее увидим на примере использования роботов в интегрированном производственном комплексе (ИПК), приходится существенно пересматривать организационные структуры. Второй этап можно ассоциировать со второй причиной автоматизации.

Второй этап развития технологии, как правило, самый продолжительный, и робототехника в этом смысле не составит исключения. Эксперты предсказывают, что совершенствование тактильных, силомоментных и зрительных датчиков и разработка систем управления на основе методов искусственного интеллекта приведут к созданию роботов третьего и четвертого поколений. Но и эти роботы не позволят выйти за пределы второго этапа развития. Это обусловлено тем, что сегодня основное направление развития — придание роботам навыков и умений человека, способности к суждениям, с последующим вытеснением или совершенствованием уже существующей технологии. Эта работа сложна, но ее цели полностью определены.

На третьем этапе развития технологии у нее появляются новые направления и области использования, предсказать которые заранее невозможно. Так, например, развитие ракетной и космической техники повлекло за собой появление спутниковой связи, оказывающей сегодня ощутимое влияние на многие стороны жизни. (Вспомним, что на заре космонавтики она преследовала иные цели, а именно исследование космоса и его использование для решения военных и промышленных задач.) Что касается робототехники, то она еще слишком молода для того, чтобы предсказывать ее дальнейшую судьбу.

2.2. Роботы и металлообработка

В настоящее время большинство промышленных роботов работают в системах металлообработки, и эта отрасль промышленности предоставляет наиболее полную информацию о количественных и качественных сторонах роботизации. Как уже говорилось, первые роботы появились на участках с агрессивной средой — около горнов и литейных машин. Повышение точности и совершенствование систем управления позволили создать робота для точечной сварки (после чего он на протяжении нескольких лет украшал собой все рекламные проспекты).

Логично предположить, что затем наступила очередь дуговой сварки. К сожалению, оказалось, что для выполнения этой операции необходимо адаптироваться к постоянно меняющимся условиям, корректируя соответствующим образом управляющие воздействия, а это требует серьезных усовершенствований робота. Одновременно проводилась роботизация окраски и других более сложных операций, требующих перемещения деталей.

В настоящее время технология применения роботов в металлообработке находится на втором этапе развития. Роботизация рассматривается как часть мероприятий по перестройке производства в целом, нацеленных на повышение его эффективности. Целесообразность роботизации сегодня оценивается по степени окупаемости капиталовложений, затратам на оборудование и достигаемому уровню качества. Поэтому для практиков очень важно знать, какие факторы оказывают влияние на эти характеристики. К сожалению, их важнейшая роль редко осознается руководителями, ответственными за автоматизацию.

Исследования показывают, что эффективность использования металлообрабатывающего оборудования крайне низка [2]. Это вызывается тем, что лишь небольшая часть времени приходится на рабочие смены, а в течение рабочего времени на полезную работу уходит лишь его меньшая часть. Эйерс и Миллер [3], сравнив окупаемость металлорежущего оборудования с другими производственными затратами, показали, что экономия, достигаемая улучшением соотношения работа — простой, может быть на порядок выше, чем при понижении зарплаты рабочих. Этот факт помогает точнее определить роль роботов в долгосрочной программе автоматизации: ее нельзя сводить лишь к замене рабочих-станочников.

Наряду с основным производственным оборудованием большие капиталовложения вкладываются в незавершенное производство. На металлообрабатывающем предприятии его объем нередко превышает стоимость основных средств. Любой расчет окупаемости капиталовложений не может игнорировать это важнейшее обстоятельство. Мероприятия, направленные на снижение объема незавершенного производства, в качестве побочных эффектов сокращают сроки подготовки производства и увеличивают его технологическую гибкость. При внедрении новой техники такие результаты весьма желательны. Не составляют исключения и роботы.

Третье свойство процесса производства, стимулирующее внедрение новой технологии — стремление к повышению качества продукции. Практически всеми признано, что повышение качества позволяет не только улучшить коммерческие характеристики продукции, но и снизить ее себестоимость. Она снижается за счет ликвидации брака и сокращения затрат на сборку, проверку, доработку, гарантийное обслуживание.

Для того чтобы точнее определить влияние роботизации на описанные выше в довольно расплывчатых терминах характеристики производственного процесса, попробуем вскрыть причины, приводящие к неэффективному использованию станочного парка и росту незавершенного производства: чтобы лечение было радикальным, надо сначала понять, почему возникла болезнь.

На рис. 2.1 представлена диаграмма распределения времени производственного оборудования. Видно, что большая часть времени уходит впустую, поскольку предприятие попросту закрыто. Тогда же, когда оно работает, вступают в действие другие причины и их совместное влияние приводит к тому, что в производственном процессе эффективно используется только 6 % общего времени. Не подумайте, что автор предлагает изменить жизнь общества так, чтобы фабрики и заводы могли бы работать больше часов в год. Находить желающих работать в цехах становится с каждым годом все сложнее, не говоря уже о работе во второй и третьей сменах. Следует просто улучшить использование оборудования, не привлекая при этом людей к работе в неудобное для них время. Сейчас даже тогда, когда по графику тот или иной станок должен работать, выполняемые на нем полезные операции занимают только 25 %

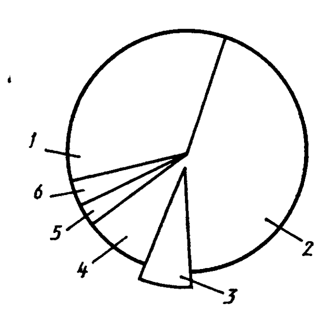


Рис. 2.1. Использование фонда календарного времени в промышленном серийном производстве. Доля собственно производства составляет 6 %:

1 — выходные, праздники, отпуска; *2* — неполное использование 2-й и 3-й смен; *3* — производство; *4* — контроль, обслуживание станков; *5* — подготовительные операции; *6* — простои

времени. Так что объем полезного времени сокращается еще больше.

Рассмотрим более подробно картину распределения времени типового производственного оборудования на примере шлифовального станка. Данные приведены в табл. 2.1.

Из приведенных данных видно, что 60 % рабочего времени шлифовальный станок не шлифует детали.

Для высокопроизводительных станков соотношение рабочего и полезного времени ничуть не лучше. Данные, приведенные в табл. 2.2, 2.3 и 2.4, относятся к специализированному высокопроизводительному оборудованию, поэтому временем, затрачиваемым на его наладку, можно пренебречь.

2.1. Типовое распределение сменного времени для шлифовального станка

Состояние	Сменное время, %
Шлифование детали	40
Обмеры, загрузка	20
Наладка	20
Ожидание и простой	13
Ремонт, обслуживание	7

2.2. Полезное время, %, высокопроизводительных станков

Оптимально	100
Установленный норматив	80
Фактически	59

2.3. Причины потерь, %, полезного времени высокопроизводительных станков

Из-за неисправностей	42
Из-за простоев	43
По вине обслуживающего персонала	16

2.4. Потери, %, рабочего времени, обусловленные неоптимальной организацией производства

Из-за низкой квалификации персонала	14
Из-за простоев оборудования	34
Из-за отвлечения персонала от работы	16
Итого от общих потерь	64

Из табл. 2.2 видно, что принятый за стандарт уровень производительности составляет 80 % от расчетного, а на практике достигается уровень, составляющий лишь 59 %.

Результаты дальнейшего анализа причин снижения производительности приведены в табл. 2.3. В простои из-за отказов оборудования включено время, необходимое квалифицированным ремонтникам для устранения аварийной ситуации. Потери от управления вручную возникают из-за нехватки квалифицированных станочников и прогулов, так и по причине медлительности рабочего.

Представив те же данные в другой форме (см. табл. 2.4), видим, что 64 % потерь возникают из-за причин, вызванных неэффективностью управления.

Введение числового программного управления не позволяет существенно улучшить положение дел. Цифры, показывающие рост производительности при внедрении числового программного управления, верны, но они часто неправильно понимаются. Как правило, рост производительности наблюдается тогда, когда несколько технологических операций на станке объединяются и выполняются без перестановки детали. Сокращение же длительности производственного цикла станка обычно куда скромнее.

В табл. 2.5 приведены результаты обследования обрабатывающих центров с числовым программным управлением. Из них видно, что собственно на металлообработку уходит менее четверти рабочего времени и можно добиться существенного повышения производительности, сократив время ожидания и простоя за счет улучшения оперативного планирования. Приведенные данные подтверждают, что по сравнению с традиционными станками время подготовки производства для станков с числовым программным управлением сокращено.

2.5. Типовое распределение сменного времени для обрабатывающего центра

Состояние	Сменное время, %
Режим резания	23
Позиционирование, смена инструмента	27
Обмеры, загрузка	18
Наладка	5
Ожидание и простой	14
Ремонт, обслуживание	13

Представленные данные получены экспериментальным путем с последующим их усреднением, поэтому возможны ситуации, для которых полученные значения будут неверны. Однако возможность таких ситуаций не дает основания сомневаться в надежности данных, и на их основании можно сделать некоторые общие выводы.

Главный из них: повышение производительности оборудования достигается в результате улучшения всех показателей его использования. Традиционно же его пытаются повысить, увеличивая скорость резания металла. Этот ресурс практически исчерпан, и дальнейшего роста производительности можно добиться, только воздействуя на вспомогательные операции. Сократить время, затрачиваемое на некоторые из них, можно путем совершенствования оборудования, другие можно ускорить, изменив процесс производства. Например, правильный подбор партий деталей и составление оптимального графика их обработки могут существенно уменьшить время перенастройки станков. В этом отношении многообещающими выглядят методы групповой технологии.

Общепризнано, что машиностроительное производство — сложнейшая структура. Но не всем известно, что выработанные многолетней практикой методы оперативного планирования и подготовки производства возникли под влиянием этой сложности. Представим себе, что некоторая деталь подвергается нескольким операциям металлообработки. График их выполнения составлен заранее, за несколько недель. Предполагается, что к моменту обработки детали все транспортные средства, инструменты и оснастка будут работоспособны. Можно ли с уверенностью считать, что так и будет, если обработка детали включает в себя 5—20 технологических операций? Нет.

К сложности процесса производства добавляются различные непредвиденные ситуации, вызывающие задержки и требующие корректировки графиков. К числу таких ситуаций относятся изменения в конструкции изделия, срыв сроков поставок, низкое качество материалов и комплектующих изделий, поломки оборудования, экстренные мероприятия — список можно продолжить.

Для борьбы с отрицательными последствиями сложности технологического процесса и непредвиденных ситуаций применяются два приема. Первый из них предусматривает создание буферных накопителей при каждом станке и технологической ячейке. Это гарантирует, что станки и ячейки всегда будут обеспечены работой, но приводит к росту объема незавершенного производства. Второй прием предусматривает изменение приоритета работ в соответствии с текущей обстановкой. Это выполняется с помощью ежедневного составления графиков, различного рода цветных пометок на деталях и диспетчеров, распределяющих работу в цехе или на участке. Само собой разумеется, что в этом случае выполнение работы с высшим приоритетом выступает как непредвиденная ситуация для работы по обычному графику.

Все сказанное выше хорошо известно, но большинство специалистов не знают, как можно улучшить сложившееся положение. Представленная на рис. 2.2 диаграмма помогает понять, исходя из каких соображений составляются графики работы цеха. На ней видно, что бóльшая часть времени уходит на ожидание и перемещение деталей. Отсюда следует, что упорядочение и повышение надежности производственных процессов намного важнее, чем их ускорение.

Учитывая все высказанные соображения, можно оценить, что дает внедрение новой

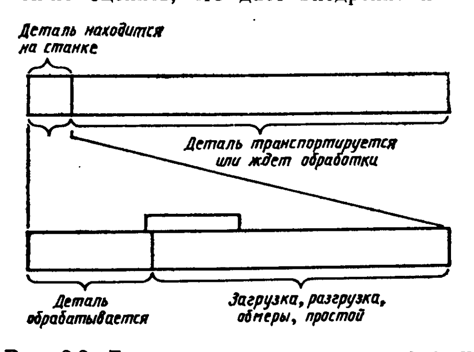


Рис. 2.2. Большие потери времени на ожидание приводят к росту объема незавершенного производства

технологии в производственный процесс. Можно заранее сказать, что основную выгоду принесет не уменьшение трудоемкости и ускорение процесса, а улучшение использования оборудования, сокращение числа перемещений деталей, уменьшение сложности взаимных связей и чувствительности производства к размерам серии. В особенности это касается роботизации. Если указанные цели достигнуты, то степень непредсказуемости процесса снижается, а это, в свою очередь, ведет к сокращению объема незавершенного производства и периода подготовки.

Можно лучше понять роль роботов в совершенствовании производства, рассматривая концепцию гибкой производственной системы (ГПС). Возможны различные практические реализации концепции ГПС: от одного станка, обрабатывающего различные детали без вмешательства оператора для смены оснастки и перенастройки, до участка с несколькими станками и (или) технологическими ячейками, выполняющими некоторый набор операций над деталями нескольких классов.

В случае ГПС с одним станком на палетах, размещенных в гнездах индексатора, закреплены различные детали. Они подаются на обработку поворотом индексатора в нужное положение. В случае более сложной ГПС с двумя станками и обслуживающим их роботом робот вводит детали в ГПС, перемещает их от станка к станку, подает готовые изделия к измерительному устройству и укладывает их на выходной транспортер.

Независимо от сложности ГПС для их успешного функционирования должны соблюдаться общие требования. Эти требования сводятся к более точному перспективному и оперативному планированию. Подбор деталей для обработки в рамках ГПС должен удовлетворять ограничениям по размерам, весу, типам выполняемых операций, их точности, оснастке и инструменту, применяемому для обработки. Планирование прохождения деталей через ГПС должно сводить к минимуму замены инструмента, требующие вмешательства оператора, и увеличивать степень использования станков. Безусловно, и при традиционном планировании производственного процесса технологи стремятся к тем же целям, но достигнуть их трудиее, поскольку в этом случае сложность выше (шире класс обрабатываемых деталей), а управляемость системы хуже (прохождение деталей через большее число производственных единиц). Как правило, в ГПС применяются обрабатывающие ячейки с числовым программным управлением (кроме ячеек иа входе и выходе системы), поэтому продолжительность их рабочих циклов известна с достаточной точностью. Это дает возможность составления точного графика, сокращения периода подготовки производства, снижения объема незавершенного производства и повышения качества продукции.

Концепция ГПС использовалась для производства самых разных деталей. В настоящее время в мире насчитывается примерно 130 ГПС. Описания этих систем [4, 5] сводятся к их техническим особенностям и спецификациям управляющей информации, о достигнутых с их внедрением преимуществах говорится редко, а если и говорится, то на качественном уровне, без соответствующих количественных показателей. Тем не менее, детальное сравнение 119 ГПС [6] показало, что только 6 из них обладают технологической гибкостью. В большинстве систем класс обрабатываемых деталей очень узок — часто он не превышает двух-трех типономиналов — или имеются очень жесткие ограничения на изменение геометрических размеров внутри класса. Называть подобные системы гибкими было бы заблуждением. Так что считать, что сегодня в мире существует 130 систем, способных обрабатывать любые детали (с ограничением только по предельным значениям веса, габаритам и точности обработки), было бы неправильно.

Различие предполагаемой и реально достигнутой степени технологической гибкости ГПС вполне объяснимо. Анализ причин его возникновения поможет нам определить роль роботов в ГПС. Основная причина снижения гибкости заключается в необходимости обрабатывать большое количество различных деталей ограниченным набором инструмента. Эта причина — малое число автоматически управляемых инструментов — ограничивает возможности практически всех ГПС. В настоящее время появляются технические средства, позволяющие справиться с этой проблемой, но стоят они очень дорого. А применение роботов позволит избежать чрезмерных затрат. Сложившаяся ситуация напоминает о том, как в свое время менялось отношение к устройству смены палет при обрабатывающем центре со сменным инструментом. Оно появилось в самых ранних моделях подобных станков, но, поскольку количество сменного инструмента в них было мало, эффективность применения устройства смены палет оказалась низкой. Его применение понадобилось только тогда, когда сменного инструмента стало значительно больше. Точно так же высокая технологическая гибкость роботов станет возможной только с появлением надежных и быстродействующих устройств для смены инструментов и захватов.

Для того чтобы ГПС обладала технологической гибкостью, недостаточно устройств, автоматически меняющих инструмент в шпинделях обрабатывающих центров. Необходимо совершенствовать и другое оборудование. Например, пока не решена задача прецизионного сверления на оборудовании со сменным инструментом. В настоящее время для этого применяется устройство со сменой сверлильных патронов, но оно нуждается в дальнейшем совершенствовании.

При токарной обработке довольно большой класс деталей может быть изготовлен из унифицированных заготовок, поэтому токарные станки с числовым программным управлением получили широкое распространение в высокопроизводительных ГПС тел вращения. К сожалению, как при токарной обработке, так и при шлифовании форма заготовок жестко ограничивается специализированными устройствами закрепления заготовки в станке. Именно прогресс в их совершенствовании будет определять дальнейшее развитие соответствующих ГПС.

Улучшения требует и работа вспомогательных служб — их роль возрастает по мере исключения оператора из процесса обработки. Хотя адаптивное управление снижает чувствительность станка к переменным параметрам (возникающим, например, за счет износа инструмента), требования к заточке резко возрастают. Переменные параметры оказывают непосредственное влияние на отклонение размеров детали от заданных и чистоту обрабатываемой поверхности. Для компенсации отклонений, как правило, требуется вмешательство оператора.

Несмотря на появление резцов специальной геометрии, ломающих стружку, при обработке стальных деталей удаление скрученной стружки представляет серьезную задачу. Если в рамках ГПС должны обрабатываться стальные детали, эта задача должна найти эффективное решение.

Совокупное действие упомянутых факторов приводит к тому, что для обеспечения надежности работы приходится жертвовать большей частью технологической гибкостью. Можно ожидать, что, справившись с ними, мы существенно повысим эффективность использования ГПС.

То же, чего больше всего опасались создатели первых ГПС, не сыграло своей роли. Еще десять лет тому назад многие эксперты считали, что главный барьер на пути широкомасштабной гибкой автоматизации — необходимость разработки программного обеспечения. Однако ими не были учтены некоторые факторы. Быстрое развитие микроЭВМ позволило эффективно разделить управляющие функции и соответствующие им компоненты программного обеспечения. Совершенные операционные системы облегчили труд прикладных программистов. Во всем мире ведутся работы по созданию новых, более мощных языков программирования, делающих его доступным для специалистов в любых отраслях знаний. В университетах, исследовательских институтах и промышленных фирмах на решение задач, связанных с разработкой программного обеспечения, затрачиваются бесчисленные человеко-часы. Ни одно другое направление развития робототехники не представляет такого гибкого подхода к решению всевозможных задач, не требуя для этого ни больших затрат, ни специалистов с высокой квалификацией в сфере промышленного производства.

Не следует, однако, думать, что задачи моделирования, оперативного планирования и управления в реальном масштабе времени тривиальны. Это большие и сложные задачи, но по сравнению с задачами проектирования оборудования пути их решения намного яснее.

Прояснив ситуацию, сложившуюся с использованием технологически гибких средств автоматизации, мы можем оценить условия успешного совместного применения этих средств и промышленных роботов. Во-первых, успешное использование автоматики предполагает крупносерийное производство или высокую степень унификации выпускаемого продукта. Роботы прекрасно вписываются в такую технологическую обстановку, повышая степень гибкости производственной системы, оснащенной специализированными автоматическими устройствами, за счет возможности выполнения различных повторяющихся операций без дополнительных затрат. Пример такого использования робота: нанесение герметика на швы кузова автомобиля. Для выполнения этой операции над крупносерийным изделием требуется универсальность. В случае применения роботов в мелкосерийном или штучном производстве, организацию производственного процесса приходится изменять так, чтобы он принял некоторые характерные черты крупносерийного производства. Все используемые детали должны размещаться в точно известных местах в заранее определенной ориентации. При выполнении таких операций, как сварка, детали должны приводиться в заданное положение и фиксироваться.

При сварке вручную такая организация производственного процесса оказывается излишней. Степень повторяемости производственного процесса должна быть достаточно высокой, при мелкосерийном производстве это требование не соблюдается. Слишком часто пренебрегают тем, что

мелкосерийные производственные процессы по своей природе изменчивы и любая попытка их автоматизации неизбежно ведет к ограничению этой изменчивости. Заметим, что если автоматизация производства сопровождается внедрением правильных методов планирования, определенная утрата технологической гибкости не так уж страшна.

Положительная сторона унификации производственного процесса — повышение качества выпускаемого продукта. Каждый шов проварен со строгим соблюдением технических условий. Любая деталь установлена в изделие именно так, как требуется. Все необходимые технологические операции выполнены. Зачастую повышение качества продукции становится достаточным основанием для роботизации мелкосерийного производства.

2.3. Перспективы роботизации

В последнее время стало модно делать прогнозы появления новых областей применения новой технологии. Те, кто составляют подобные прогнозы, любят ставить в них вопросы специалистам, обвиняя их в сопротивлении новому. Почему технология А развивается черепашьими темпами? Почему никто не хочет роботизировать операцию Б? Правильным ответом на подобные вопросы было бы замечание о том, что мы не знаем, с какой скоростью должен идти прогресс в той или иной области. Не исключено, что его скорость кое-где превышает экономически оправданную. Тем не менее, специалисты проявляют чудеса стойкости, придумывая различные причины снижения этой скорости по сравнению с предсказанной.

Прогноз развития робототехники в США на 1992 г. определяет суммарные капиталовложения суммой от 1 до 5 млрд. долл., а общее число роботов — от 20 до 25 тысяч. Ценность этого прогноза близка к нулю, он сводится к простому факту: применение роботов будет постоянно возрастать. Гораздо полезнее было бы исследовать возможности современных роботов и выявить, чего им не хватает для более широкого применения. Только после соответствующих усовершенствований можно ждать роста роботизации в той или иной сфере.

Такие характеристики, как диапазон перемещений и грузоподъемность, следует рассматривать совместно, поскольку их сочетание оказывает непосредственное влияние на точность. Например, робот с габаритным размером рабочего пространства 2,5 м и грузоподъемностью 4,5 кг имеет точность в пределах 0,5 мм. Меньший робот, с рабочим пространством размером 1,25 м и грузоподъемностью 2,25 кг обеспечивает точность порядка 0,3 мм. Поскольку для выполнения большинства технологических операций, включающих в себя позиционирование, загрузку или сборку деталей, требуется более высокая точность, для дальнейшего роста роботизации этих операций требуется ее повышение. Для повышения точности придется повысить механическую жесткость манипулятора и применить точную систему управления, а повышение жесткости манипулятора без уменьшения его рабочего пространства представляет собой довольно сложную конструкторскую задачу.

В настоящее время программирование большинства роботов выполняется путем обучения каждому движению и запоминания всех точек, через которые проходит рабочий орган при выполнении некоторых операций. Если операция непрерывна или часто повторяется, то запрограммировать робот таким способом не представляет труда. Однако этот прием не годится в случае мелкосерийного производства в сочетании с малой повторяемостью операций. Для того, чтобы успешно использовать роботы в таких случаях (а их очень и очень много), необходимы два усовершенствования. Надо иметь возможность программирования робота в автономном режиме, составлять для него программу так, как это делается для станка с программным управлением. Сегодня возможности такого программирования очень ограничены. Кроме того, следует усовершенствовать режим работы робота в абсолютных координатах, для того, чтобы в программе можно было задавать перемещение рабочего органа в ту или иную точку пространства с абсолютной точностью, сравнимой с разбросом целевого положения. В настоящее время абсолютная точность на порядок ниже. Ее улучшения можно добиться не только повышением жесткости и точности системы управления, но и применением калибрования.

В большинстве случаев роботы применяются для выполнения жестко структурированных повторяющихся операций. Перемещаемые детали не отличаются друг от друга и всегда находятся в строго определенных местах. Свариваемые части всегда закрепляются в одном и том же положении. К сожалению, большинство производственных операций редко в точности повторяются и слабо структурированы. Если для их выполнения нужно применять робот, он должен уметь приспосабливаться к изменениям. Иногда в процессе роботизации можно унифицировать технологическую обстановку, но это далеко не всегда оправдано экономически. Чтобы отвечать этому требованию, роботы должны реагировать на

касание и приложенное усилие. Например, при простейшей сборочной операции — вставлении штифта в отверстие — робот должен воспринимать усилие сопротивления, изменяющееся по мере выполнения операции. Конечно, если все условия выполнения операции известны, компоненты проверены и сборочная система отлажена, это может оказаться излишним, но при мелкосерийном производстве так бывает редко.

Общепризнано, что техническое зрение увеличивает возможности робота, позволяя работать в неструктурированной технологической обстановке. В настоящее время возможности использования зрительных систем сильно ограничены. Роботы могут различать детали по форме и определять их ориентацию, допуская некоторую неопределенность технологической обстановки. Но в большинстве случаев этого недостаточно: требуются оценка обстановки в рабочей зоне в целом и реагирование на складывающиеся в ней ситуации. Человек делает все это практически подсознательно, а для реализации таких действий методами искусственного интеллекта необходима огромная вычислительная мощность.

Для выполнения слабо структурированных операций необходимо еще одно свойство — подвижность. В настоящее время роботизированные операции не могут выполняться над большими объектами: например, роботы нельзя использовать для сварки корпусов судов, арматуры зданий, крупногабаритных изделий. Существуют подвижные роботы, устанавливаемые на тележках или на монорельсе, но их подвижность недостаточна.

Все сказанное можно подытожить следующим образом: для того, чтобы автоматизировать выполнение несложных для человека операций, необходимы существенные усовершенствования роботов. Таких операций — миллионы, и это сильно стимулирует развитие робототехники.

Темпы роста применения тех или иных технических средств трудно предсказать из-за того, что ликвидация «узких мест» в производстве идет не плавно, а скачкообразно. Каждый такой скачок может повлечь за собой возникновение новых областей применения, ранее не рассматривавшихся. С другой стороны, отсутствие скачков в развитии может привести к свертыванию применения. На Двенадцатом Международном симпозиуме по промышленным роботам [7] была представлена библиография всех материалов, ранее представленных на подобных симпозиумах, начиная с первого. Анализируя ее, можно сделать некоторые заключения о тенденциях развития робототехники.

Проблемы использования методов искусственного интеллекта обсуждались еще на первом симпозиуме. К настоящему моменту эти методы реализованы в некоторых серийных устройствах, но они не получили широкого распространения. Можно с уверенностью сказать, что внедрение искусственного интеллекта в промышленную робототехнику идет сложнее и медленнее, чем этого ждали 12 лет назад. Сегодня, как и раньше, большое внимание уделяется роботизации металлообработки, но отмечается существенное расширение областей применения роботов — от автоматизированной стрижки овец до украшения кондитерских изделий. Следует отметить, что практически во всех новых приложениях используются технологические приемы, ранее применявшиеся в системах металлообработки. Скорее всего, такая тенденция будет определять развитие робототехники на ближайшие три — пять лет. После этого развитие новых приемов позволит автоматизировать другие, более сложные (для робота, а не для человека) операции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Naisbitt, John, *Megatrends: Ten New Directions for Transforming our Lives*, Warner Books Inc., New York, 1982.
2. Carter, C. F., Jr. Toward Flexible Automation, *Manufacturing Engineering*, August 1982.
3. Ayres, Robert U., and Steven M. Miller, *Robotics Applications and Social Implications*, Ballinger Publishing Co., Cambridge, MA, 1983.
4. Hutchinson, G. K., Flexible Manufacturing Systems in the United States, *Automation Manufacturing*, 1979.
5. Dupont-Gatelmand, C., A Survey of Flexible Manufacturing Systems, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. **1**(1), 1982.
6. Ito, Y., Present Status and Trends in Flexible Manufacturing Systems, *Journal of Japan Society of Mechanical Engineers*, **85**(761), 1982.
7. Fleck, J., The Development and Diffusion of Industrial Robots, Proceedings 12th International Symposium on Industrial Robots, Paris, France, 1982.

Глава 3
РОБОТЫ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

Ч. А. Розен, фирма «Мэшин интеллидженс», Солнечная Долина, Калифорния

3.1. Введение

Завод далекого будущего представляется сегодня в виде сочетания процессов, управляемых ЭВМ, станков с программным управлением, подвижных и неподвижных промышленных роботов, оснащенных системами очувствления. Такой завод будет обслуживать небольшая бригада опытных техников под руководством еще меньшей группы высококвалифицированных инженеров, специалистов по информатике и бизнесменов. Планирование, проектирование, производство, распределение и маркетинг товаров будут осуществляться с помощью ЭВМ, используемых в качестве инструмента обработки информации и накопления знаний. Такие же ЭВМ будут управлять всеми производственными процессами. Подобный завод представляет собой сложнейшую систему, которая может возникнуть только в результате эволюционного развития, так как имеющиеся сегодня в нашем распоряжении подсистемы пока еще не решают поставленных перед ними задач (или затраты на них слишком велики). Даже когда появятся более совершенные и высокопроизводительные подсистемы, останутся нерешенными сложные и трудоемкие задачи стандартизации, организации интерфейсов и интеграции этих подсистем в единое целое — надежную производственную систему.

В чем разница между так называемой интеллектуальной компьютерной системой и всеми остальными системами? Со временем критерии интеллектуальности меняются. За сравнительно короткий период (не более 30 лет) успехи информатики и вычислительной техники предоставили в наше распоряжение средства усиления интеллектуальных возможностей человека, по своей мощности далеко превосходящие сегодняшние потребности. До появления счетных устройств выполнение арифметических действий над числами считались прерогативой человека. Но возможности ЭВМ по переработке символьной информации были освоены настолько быстро (в историческом масштабе времени), что в истории науки и техники не удается отыскать прецедента этому явлению. Оно позволило подняться на новый уровень абстракции в обработке данных и положило начало революционному рывку в развитии информатики. Сегодня ЭВМ способны выполнять аналитические выкладки, оперировать законами физики, научными теориями и гипотезами, причинами и следствиями, и их «интеллектуальные способности» постоянно возрастают.

Большинство специалистов соглашается с тем, что хранение и обработка информации в банках данных, моделирование, обработка текстов, машинная графика, управление процессами, компьютерные игры и многие другие области применения ЭВМ непосредственно относятся к сфере интеллектуальной деятельности. Использующие более высокий уровень абстракции системы распознавания образов, первоначально созданные для обработки изображений, привели к бурному развитию методов фильтрации и выделения полезной информации из любых сложных сигналов. О большинстве из перечисленных систем не принято говорить «интеллектуальные», мы привыкли к ним. Сегодня к сфере «искусственного интеллекта», или «машинного интеллекта», относят, как правило, программы, предназначенные для моделирования и изучения процессов восприятия и интерпретации информации, распознавания естественных языков, выполнения аналитических выкладок и решения задач, самообучения, представления и использования знаний (экспертные системы). По истечении 20 лет эмпирического развития (включавшего в себя построение концепций, отладку и анализ программ) оказалось, что очень мало разработанных методов получили применение в промышленных системах, да и системы эти сегодня часто называют не интеллектуальными, а механистическими. В настоящей главе рассматриваются методы искусственного интеллекта, используемые в робототехнике.

3.2. Робототехнические системы

3.2.1. Робототехнические системы первого поколения

Подавляющее большинство находящихся сегодня в промышленной эксплуатации роботов принадлежит первому поколению. Вычислительная мощность их систем управления мала (иногда равна нулю). Единственная «интеллектуальная» функция такого робота — запоминание последовательности действий, задаваемой оператором с обучающего пульта-приставки. Эти роботы как бы

«слепоглухонемые». Технологическая обстановка, в которой они работают, должна быть полностью детерминированной. Это включает в себя требования точного позиционирования деталей, точного определения пространственных связей с другим оборудованием и обеспечения безопасности людей, находящихся вблизи устройств. Во многих случаях дополнительные затраты на создание полностью детерминированной технологической обстановки оправдываются за счет повышения производительности, качества продукции и увеличения срока службы оборудования. Однако для большинства операций, включающих в себя работу с материалами, технический контроль, сборку, требуется более «осмысленное» поведение робототехнической системы, в противном случае ее производительность и себестоимость будут неприемлемыми.

3.2.2. Робототехнические системы второго поколения

Первые роботы второго поколения появились, когда в систему управления был встроен недорогой микропроцессор. Стало возможным рассчитывать элементы движения звеньев манипулятора в реальном масштабе времени по всем степеням подвижности. Это позволило реализовать плавные перемещения рабочего органа по заданным траекториям (например, вдоль заданного в пространстве отрезка прямой линии). Роботы второго поколения могут выполнять операции с деталями, лежащими на движущемся транспортере. В систему иногда встраиваются силомоментные и дальномерные датчики, обеспечивающие некоторую адаптивность к изменениям.

Основные области применения роботов второго поколения связаны с процессами автоматического производства: точечной сваркой, окраской распылением, дуговой сваркой, сборкой. При работе над роботами второго поколения стало ясно, что перспектива их развития связана с ростом адаптивности на базе использования более совершенных датчиков и увеличения вычислительной мощности системы управления.

3.2.3. Робототехнические системы третьего поколения

Робототехнические системы третьего поколения появились уже несколько лет тому назад, но есть основания считать, что раскрыть их возможности полностью удастся еще не скоро. Отличительная черта этих систем состоит в использовании нескольких работающих асинхронно микроЭВМ, каждая из которых реализует автономные функции. Типичный робот третьего поколения располагает специальным управляющим процессором для каждого из степеней подвижности, и центральным процессором, координирующим их работу. Центральный процессор выполняет и другие функции управления высшего уровня.

Каждый из процессоров нижнего уровня обрабатывает сигналы внутренних датчиков положения и скорости движения «своего» звена манипулятора и, по сути дела, является частью системы сервоуправления этим звеном. Центральный процессор координирует перемещения по отдельным степеням подвижности, выполняет преобразования координат при работе в различных координатных системах, взаимодействует с внешними датчиками, другими роботами и станками, хранит в своей памяти программы, через сеть связи обменивается информацией с другими ЭВМ. Хотя все перечисленные функции могли бы выполняться одной ЭВМ, современные системы чаще используют иерархические системы распределенной обработки данных. Это объясняется тем, что некоторые дополнительные затраты на процессоры нижнего уровня вполне оправдываются гибкостью системы и упрощением ее изменения.

3.3. Интеллектуальные робототехнические системы

3.3.1. Адаптивные роботы, включенные в сеть связи

Роботы третьего поколения, оснащенные совершенными внешними датчиками, обменивающиеся информацией со станками и взаимодействующие через локальную сеть связи с другими ЭВМ, проявляют существенные признаки «интеллектуального» поведения. Робот, связанный с системой технического зрения, дальномером и другими системами очувствления (тактильной, силомоментной), может работать с находящейся в произвольном положении деталью, проводить ее технический контроль, переносить ее в положение, заданное относительно положения другой детали, выполнять сборочные операции типа вставления детали в паз или отверстие, корректировать выполнение сборочной операции по сигналам, получаемым с силомоментных и дальномерных датчиков, закреплять установленную деталь и проверять собранный сборочный узел. Центральный процессор такого робота может накапливать статистическую информацию о выполненной работе, случившихся сбоях (с классификацией по причинам), осуществлять связь по сети с ЭВМ других подсистем и с главной ЭВМ АСУ предприятия.

Перечисленные функции далеко не исчерпывают его возможностей. В список основных функциональных элементов интеллектуальной робототехнической системы можно включить следующее:

способность робототехнической системы адаптироваться к текущей технологической обстановке, сравнивая данные, полученные от подсистем очувствления, с некоторой эталонной ситуацией и рассчитывая в реальном масштабе времени необходимые поправки траекторий движения или выполняемых действий;

возможность связи и взаимодействия с периферийными устройствами (например, питателями, вспомогательными роботами) и другими ЭВМ. Эта возможность позволяет создавать интегрированные производственные системы, предусматривающие защиту от сбоев и коррекцию производственного процесса для достижения наивысшей отдачи оборудования.

Конечно, степень интеллектуальности подобных систем во многом определяется сложностью последовательности выполняемых ими действий и надежностью функционирования оборудования. Сегодняшний уровень развития техники очувствления заставляет существенно ограничивать возможности робототехнической системы автоматизацией простых процессов. Однако в ближайшие три-четыре года можно ждать значительного улучшения характеристик зрительных, тактильных и других подсистем очувствления. Это позволит существенно повысить степень адаптивности роботов. Но степень интеллектуальности робота и в дальнейшем будет зависеть от архитектуры системы и качества программного обеспечения, управляющего действиями отдельных подсистем и координирующего их.

3.3.2. Программирование адаптивного робота

Процесс программирования адаптивного робота в первом приближении можно разделить на два этапа.

На первом составляются программы, управляющие последовательностями действий, описываются перемещения, детали, скорости, операции с инструментами и т. д. Некоторые последовательности могут быть введены в систему управления в процессе обучения, формирующего соответствующие управляющие подпрограммы, выполняемые по прерываниям от внешних датчиков или при сочетании некоторых условий. Как правило, у роботов первого и второго поколений ввод таких последовательностей выполняется при помощи выносного пульта. Этот метод программирования робота, находящегося в активном состоянии, привлекателен тем, что он хорошо освоен заводским персоналом, имеющим недостаточную квалификацию в области программного обеспечения.

На втором этапе составляется та часть программ, которая управляет функциями адаптации: сбором информации от датчиков, преобразованием координат, проверкой условий, взаимодействием с другими устройствами и вычислительными машинами. Это программирование выполняется в автономном режиме устройства управления профессиональным программистом.

Скорее всего программирование с помощью пульта-приставки сохранится на протяжении многих лет даже для роботов третьего поколения, поскольку альтернативой программированию в автономном режиме может быть только создание сложной модели робота и его технологического окружения, учитывающей как динамические, так и статические характеристики. Головная программа, организующая адаптивность поведения и осуществляющая связь с другими системами, будет вызывать запомненные в режиме обучения операционные последовательности как подпрограммы.

Разработка языков высокого уровня, предназначенных для описания роботизированных сборочных процессов, уже несколько лет относится специалистами к области искусственного интеллекта (см. гл. 22 и 23). Создание такого языка позволит осуществить программирование сложных сборочных операций в автономном режиме (возможно, с вызовом некоторых подпрограмм, введенных в процессе обучения).

Многим кажется привлекательным использование естественного языка для управления роботом. Это позволит работать на более высоких уровнях абстракции. Например, часть программы сборки какого-либо изделия могла бы выглядеть так:

ИЗВЛЕЧЬ ВИНТ ИЗ БУНКЕРА НОМЕР 1.

«Хорошая» система должна проанализировать это предложение, найти при помощи зрительной подсистемы объект (винт), спланировать перемещение рабочего органа в бункер номер 1 (его расположение сохраняется в памяти), захватить один винт (предварительно определив параметры его положения с помощью зрительной подсистемы), проверить, действительно ли винт захвачен (для этого есть тактильные датчики), и ждать дальнейших приказаний.

«Очень хорошая» система, работающая с большим уровнем абстракции, могла бы получить такую инструкцию:

СОЕДИНИТЬ ДЕТАЛИ А И Б ВИНТОМ ДЛИНОЙ В ЧЕТВЕРТЬ ДЮЙМА.

Предполагается, что предварительно робот соединил детали и привел их в положение, в котором они должны быть скреплены. Кроме того, «очень хорошая» система должна «знать», где находятся болты всех нужных типоразмеров. Вынув винт из бункера, ориентировав его надлежащим образом и определив с помощью зрительной подсистемы точные параметры положения отверстий в соединяемых деталях, она вставляет его и проверяет, насколько хорошо выполнено соединение. Все эти действия выполняются под управлением подпрограмм, последовательность вызова которых определяется управляющей программой высокого уровня — планировщиком, обрабатывающим инструкции, поступающие в систему.

Очень важно, что степень интеллектуальности робота можно повышать безгранично, занося в память ЭВМ больше знаний об окружающем мире. Для того чтобы эти знания можно было использовать на практике, должны запоминаться соответствующие последовательности действий робота. В настоящее время уровень «очень хорошей» интеллектуальной системы еще не достигнут, но можно предполагать, что в течение пяти лет первые такие системы появятся в исследовательских лабораториях.

3.4. Дальнейшее развитие интеллектуальных робототехнических систем

В настоящее время интеллектуальные робототехнические системы делают свои первые шаги. Связанные с ними исследования (особенно в области торговли и промышленного производства) стимулируются снижением стоимости вычислительной техники и совершенствованием программотехники. Широкое распространение адаптивных роботов третьего поколения, вероятно, повлечет за собой понимание того, что интеллектуальность технических устройств не только возможна, но и весьма желательна. Также вероятно, что возлагаемые на интеллектуальные системы надежды окажутся нереальными, превышающими их возможности.

В следующих разделах рассматриваются некоторые области исследования искусственного интеллекта, перспективные с точки зрения разработки робототехнических систем.

Системы очувствления. Восприятие и интерпретация данных об окружающей обстановке играют важнейшую роль при управлении действиями адаптивного робота (как, впрочем, и при формировании поведения человека). Физики, химики, инженеры создали огромное множество датчиков, некоторые из которых применяются пока только в лабораторных условиях. Применение современных технологических приемов микроминиатюризации и герметизации позволит применить эти датчики в системах очувствления промышленных роботов.

Выделение полезной информации из сигналов датчиков и ее обработка будут выполняться недорогими высокопроизводительными процессорами. Можно предположить, что со временем применение совершенных подсистем очувствления даст роботам возможность собирать, оценивать и анализировать информацию об окружающей среде, недоступную для человеческого восприятия. При этом будут использоваться как пассивные, так и активные способы взаимодействия со средой. Получаемая от подсистем очувствления информация будет включать в себя параметры электромагнитных излучений по всему спектру (от постоянных магнитных полей до рентгеновского излучения); параметры акустических колебаний (от инфра- до ультразвуковых); температуру, давление, влажность; данные о химической и физической структуре материалов, полученные методом спектроскопии, а также о присутствии в окружающей среде загрязняющих примесей (даже в минимальной концентрации); электрические сигналы от измерительных приборов (возможно, даже медицинских) и многое другое.

Можно предположить, что через некоторое время датчики будут выпускаться в одном корпусе со встроенным процессором и обеспечивать обмен информацией по стандартному интерфейсу. Такие датчики в модульном исполнении можно рассматривать как периферийное оборудование робототехнической системы.

Экспертные системы (системы баз знаний). В настоящее время развитие экспертных систем (примерами которых могут служить системы Стенфордского института «Дендрал», «Мицин» и «Проспектор») почти достигло уровня, на котором возможно их промышленное использование. Такие системы хранят в закодированном виде тщательно отобранные факты и связи, относящиеся к некоторой четко определенной области знаний. Информация вводится в них высококвалифицированными специалистами в этой области. Пользователь системы (не обязательно специалист в указанной области) получает доступ к базе знаний с помощью диалоговой программы. Экспертная система может оперировать эмпирическими правилами, законами физики, моделями процессов, таблицами, базами данных различных типов.

Ожидается, что на заводах будущего экспертные системы найдут широкое применение на всех уровнях организации производственного процесса. На этапе автоматизированного проектирования конструктор сможет воспользоваться экспертной системой для выбора материалов, подбора покупных изделий, выбора механических узлов, построения картины распределения механических напряжений, теплового анализа, поиска способов сборки и уточнения деталей многих других технологических процессов. В частности, экспертная система может быть ориентирована на помощь конструктору и технологу в создании деталей и узлов, предназначенных для изготовления на роботизированных системах, а не вручную. Например, снижение требований к возможностям захвата и зрительной подсистемы может существенно повысить производительность современных робототехнических систем. Проектирование деталей, которые просто распознавать, проверять, захватывать, соединять с другими деталями, закреплять, требует специальных знаний, которые можно формализовать и преобразовать в соответствующую экспертную систему.

Существует множество возможностей использования экспертных систем в промышленном производстве: снабжении, маркетинге, учете, управлении качеством, распределении ресурсов и других областях. Можно предположить, что соответствующие системы будут разработаны в ближайшем будущем.

Распознавание и понимание речи. Уже сегодня на рынке вычислительной техники имеются системы речевого ввода с ограниченным словарем. Некоторые из них могут работать даже с простыми предложениями. В большинстве систем требуется предварительная настройка на голос пользователя. В настоящее время ведутся работы по созданию системы, распознающей непрерывную речь в реальном масштабе времени с расширенным словарем и, по возможности, не требующей предварительной настройки на голос пользователя. Возможности создания такой системы во многом зависят от результатов исследовательских работ по распознаванию естественного языка.

Даже не очень совершенная система распознавания речи, способная разбирать слова и простейшие предложения, позволит реализовать весьма заманчивый способ обучения роботов. Он предполагает, что часть рабочей программы, связанная с движениями манипулятора, вводится, как прежде, с помощью обучающего пульта-приставки, а информация, касающаяся прерываний, использования подсистем очувствления, проверок, ветвлений процесса, связи с другими устройствами, временных интервалов, точного позиционирования и т. п., «наговаривается» программистом. В результате получается полная рабочая программа, которую можно отлаживать и редактировать в рабочем режиме системы. Не требуется моделирования на ЭВМ — в качестве модели окружающей среды выступает сама эта среда. В будущем следует ожидать появления оптимизирующих программ, которые могли бы существенно повышать производительность роботизированных систем, модифицируя неоптимальную программу, составленную человеком в рабочем режиме.

Описанная программная система могла бы стать полезным инструментом для решения многих важных задач. Любая более или менее совершенная роботизированная система должна иметь возможность переключения на режим телеуправления, в котором она все время работает по командам оператора, и полуавтоматический режим, при котором оператор командами задает повторяющуюся последовательность действий, а ее выполнение происходит под управлением подпрограммы. В последнем режиме оператор может одновременно управлять несколькими системами, берущими на себя монотонную или опасную для человека часть работы.

Другие аспекты искусственного интеллекта. Исследования, связанные с решением задач, планированием, автоматическим программированием и верификацией программ, обучением, логическим выводом, находятся на начальных этапах. Вряд ли они дадут в ближайшее время практические результаты. Существенного повышения степени интеллектуальности робототехнических систем следует ждать лишь тогда, когда широкое распространение получат роботы третьего поколения. Только тогда консерватизм промышленности будет вынужден отступить перед фактом существования роботов, способных приспосабливаться к работе в заранее неопределенных условиях. Для введения дополнительных функций роботов, связанных с развивающимися сегодня исследованиями, должна быть подготовлена соответствующая почва.

Гибридные телеуправляемые роботизированные системы. В предшествующих разделах речь шла в основном о промышленных роботах. В США в промышленности занято примерно 20 % работающего населения, насчитывающего 100 миллионов человек. В сельском хозяйстве занято 4 %, примерно 5 % приходится на долю добывающих отраслей индустрии. Все остальное поглощается отраслями обслуживания. К ним относятся: армия, строительство, образование, транспорт, торговля, пожарная охрана, секретные службы, финансовые органы, «индустрия» свободного времени, органы управления. По мнению автора, количество телеуправляемых и роботизированных систем, применяемых в отраслях обслуживания, уже при жизни следующего поколения превысит количество систем промышленного назначения. Более того, можно предсказать широкое развитие рынка систем бытового назначения. Они будут предназначены, в первую очередь, для обслуживания престарелых и больных с ограниченными возможностями передвижения, неспособных поднимать и переносить различные предметы, выполнять уборку квартиры и другие работы по дому. К концу века к этой категории в США будут относиться не менее 15 % населения (около 35 миллионов человек).

В настоящее время автономные роботы не могут «разобраться» в сравнительно неупорядоченной обстановке на улице и в квартире. К созданию «самостоятельного» робота должно привести развитие систем логического вывода. Но уже сегодня можно создать полуавтоматический робот (систему с гибридным телеуправлением) приемлемой стоимости, способный выполнять все перечисленные выше работы. Бо́льшую часть интеллектуальных задач, встающих перед таким роботом, решает оператор, взаимодействующий с ним. Взаимодействие должно осуществляться с помощью самых современных «дружественных пользователю» интерфейсов, в состав органов управления которых входят выключатели, джойстик, система речевого ввода. Часто выполняемые последовательности операций должны выполняться автоматически, под управлением подпрограмм, вызываемых оператором, с использованием подсистем очувствления. Операции, встречающиеся достаточно редко, выполняются в пошаговом режиме, причем команды на выполнение каждого шага подаются оператором точно так же, как при обучении промышленного робота — с переносного пульта. Последовательность команд может быть запомнена в качестве процедуры, которую можно будет впоследствии вызывать. Короче говоря, наши «новые рабы» должны взять на себя выполнение опасных, физически трудных и монотонных операций, причем управление простейшими из них должно быть автономным. По мере совершенствования робототехнических систем человек должен отдавать своим «рабам» все меньше приказаний.

Можно спорить о желательности (с социальной точки зрения) экономически обоснованной автоматизации большинства из выполняющихся сегодня вручную работ, но подобные дебаты в условиях рыночной конкуренции смогут лишь замедлить, но не предотвратить создание соответствующих автоматических систем. Тенденция к росту степени автоматизации наблюдается во всем мире, и международная конкуренция ведет к появлению все новых и новых систем.

Когда товарный объем рынка специализированных роботов станет сравним с соответствующим показателем для автомобилестроительной промышленности, стоимость робототехнической системы с гибридным управлением будет не выше стоимости автомобиля, который сегодня превратился в сложнейшую систему, буквально «нашпигованную» механическими, термодинамическими и электронными устройствами, в том числе системой «дружественного пользователю» управления.

Бытовой робот легко представить в виде небольшого подвижного устройства, снабженного относительно низкоскоростным манипулятором, подсистемами зрительного и силомоментного очувствления, управляемого с помощью речевого ввода и джойстиков, с набором приспособлений для переноски предметов, уборки и других работ. Такому устройству не нужны высокая скорость и большая точность. Электропитание сделает его чистым и безопасным в эксплуатации. Бортовая микроЭВМ такого робота может использоваться не только для управления, ее можно применять для организации денежного учета, видеоигр, хранения данных. Конечно, такой робот незаменим для больных и инвалидов, но пользоваться им могут не только они. Со временем пользоваться таким роботом будет выгоднее, чем услугами домработницы, уборщика, сиделки.

Робототехнические системы с гибридным управлением могут использоваться в военных целях. Вооруженные силы США разрабатывают и испытывают в условиях, приближенных к боевым, роботизированную систему перемещения материальных объектов. В ее состав входят шагающие и колесные подвижные роботы. Аналогичные системы можно использовать в строительстве и сельском хозяйстве. Создаются глубоководные, космические и арктические роботы. Возможности применения роботов поистине безграничны: погрузочно-разгрузочные операции, тушение пожаров, работа с вредными и ядовитыми химикатами, чистка, мытье и окраска архитектурных сооружений, управление дорожным движением — вот далеко не полный перечень областей, где роботы уже используются. Чтобы реализовать эти возможности, необходимо создать более сложные и дорогие системы, возможно, специализированные, отличающиеся по размеру, грузоподъемности, точности, быстродействию. Кроме того, немного пофантазировав, можно представить себе робота — партнера по игре, робота — помощника кол-

лекционера или домашнего мастера, робота — манекена, робота — киноактера, робота — балерину и многих, многих других.

3.5. Заключение

После 25 лет лабораторных исследований и разработок методы искусственного интеллекта завоевали небольшой, но постоянно растущий плацдарм в сфере промышленного производства. В основном его занимают подсистемы очувствления, используемые для повышения адаптивности роботов. Через 10—15 лет к ним присоединятся экспертные системы, системы планирования и языки высокого уровня для программирования роботов. Будут созданы роботы с гибридным управлением для использования в сфере обслуживания, и, наверное, именно они станут самым многочисленным отрядом интеллектуальных роботов. Сегодня мы живем в эпоху расцвета электроники интегральных схем и юности информатики. Начало двадцать первого века будет отмечено историками техники как эпоха интеллектуальных механических помощников.

Часть 2
МЕХАНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Глава 4
УСТРОЙСТВО МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

У. Сиринг, Массачусетский технологический институт, г. Кэмбридж, шт. Массачусетс,
В. Шейнман, фирма «Отомэтикс», г. Биллерика, шт. Массачусетс

4.1. Процесс проектирования

Проектирование механической части промышленного робота требует затрат высококвалифицированного инженерного труда специалистов различных специальностей. Наиболее важную роль играют такие дисциплины, как техническое и структурное проектирование, прикладная механика, теория управления и электротехника. Конструкторские решения в области робототехники обычно определяются совокупностью технических характеристик, таких, как количество звеньев, габариты, диапазон нагрузок и скорость. Роботы конструируются не для выполнения конкретных операций, они должны удовлетворять некоторому критерию универсальности. Чтобы робот мог выполнять различные задания с достаточной точностью, необходимо обеспечить прочность и жесткость таких составляющих манипулятора, как подшипники, валы, соединения. При выборе приводных двигателей учитываются режимы работы при средних нагрузках или при перегрузках, а также ускорения вращения и влияние сил тяжести. Для зубчатых передач учитываются предельные нагрузки на зубья. Подшипники и валы подбираются с учетом нагрузки, под которой им предстоит работать, и структурных особенностей системы, таких, как максимальная амплитуда колебаний звеньев и величина пропускного зазора для кабелей или пневмоприводов. Сочленения проектируются исходя из требуемого диапазона движений и с учетом заданной точности. Выбор узлов осуществляется обычно по соответствующим каталогам, чтобы в конструкции манипулятора максимально использовались доступные стандартные детали. Однако при таком подходе трудно бывает оценить динамику манипулятора, а значит, и определить его характеристики.

Первые промышленные роботы, как правило, имели широкий диапазон возможных перемещений, так как предназначались для выполнения весьма разнообразных заданий. Предполагалось, что высокая степень технологической гибкости сделает их более конкурентоспособными. Однако гибкости можно достигнуть только за счет повышения стоимости и усложнения технического обслуживания. Современные роботы проектируются для выполнения определенных классов заданий. Особенности задания, рабочей зоны и требования к переориентации определяют размеры робота, число степеней подвижности и кинематическую схему манипулятора. Кроме того, следует учитывать требования, накладываемые характером движения рабочего органа при выполнении задания: отслеживания шва при дуговой сварке, движением по заданной траектории при окраске распылением, точным позиционированием при автоматизированной сборке, точным повторением движений в процессе переноски деталей, высокой разрешающей способностью при выполнении точных перемещений в системах с искусственным очувствлением.

Эта глава посвящена основным принципам проектирования механической части манипулятора. Кроме того, этот материал можно использовать при оценке существующих или перспективных конструкций, а также руководствоваться им при выборе серийного робота по заданным требованиям.

Первым и наиболее важным этапом проектирования робота является определение класса заданий, которые должен выполнять робот. Он должен быть очень точно определен, поскольку без этого невозможно составить список требований к манипулятору и определить его эксплуатационные характеристики. Роботов, способных выполнить неограниченно широкий класс заданий, не существует. Таким образом, технологическая гибкость робота должна рассматриваться лишь в пределах класса заданий, для которых он предназначен. Класс заданий должен быть точно определен, даже если это потребует существенных усилий (см. гл. 5).

Выбор класса заданий определяет все дальнейшие проектные решения. При вы-

боре конфигурации манипулятора обычно рассматривается несколько альтернатив. Альтернативные варианты должны быть проработаны до уровня размеров основных компонентов и оценок динамических характеристик. На основании этих оценок производится выбор конфигурации манипулятора, наиболее подходящей для выполнения заданий выбранного класса. Прежде чем перейти к рабочему проектированию, целесообразно проверить возможности конструкции на простом макете. Это поможет конструктору обнаружить и разрешить ряд вопросов, связанных с геометрическими особенностями системы, структурной целостностью, прокладкой магистралей и использованием рабочего пространства.

Из множества альтернатив, возникающих на стадии рабочего проектирования промышленного робота, необходимо выбрать наиболее удачные решения. Зачастую из выбранного проектного решения вытекают противоречивые требования к компонентам системы. Ниже будут рассмотрены важнейшие принципы проектирования. В первых двух подразделах рассматриваются технические показатели системы, а следующие четыре посвящены ее архитектуре. В последних шести подразделах рассматриваются эксплуатационные характеристики системы. Далее описываются принципы проектирования большинства компонент механической части промышленного робота. В заключение приводится несколько алгоритмов выбора приводов робота и расчета передач.

4.2. Принципы проектирования

4.2.1. Технические характеристики системы

Рабочее пространство, рабочая зона и рабочие диапазоны. На схеме рабочей зоны манипулятора должны быть выделены области ограниченной доступности (в большей части рабочего пространства, если не во всем, будут полностью использоваться все степени подвижности). Эти ограничения вытекают из диапазонов перемещения звеньев, длины соединений, углов между осями и их комбинаций. Манипуляторы с вращательными звеньями обычно лучше работают в серединах рабочих диапазонов звеньев, чем на их границах. Возможные перемещения сочленений и звеньев манипулятора должны быть выбраны с запасом, чтобы обеспечить переориентацию при смене рабочего органа (размеры инструмента обычно влияют на размеры рабочей зоны).

Грузоподъемность. Грузоподъемность — одна из важных характеристик робота. Она тесно связана с величинами рабочих скоростей и ускорений. Для сборочных роботов такие характеристики, как предельные ускорения и жесткость манипулятора, имеют большее значение, чем максимальная скорость и грузоподъемность, поскольку при сборке решающую роль играет скорость выполнения малых перемещений. При дуговой сварке, когда требуется отслеживание шва на малых скоростях, основное внимание уделяется скорости и точности перемещения по траектории. Грузоподъемность должна рассматриваться как переменная величина. Целесообразно описывать конструкцию манипулятора в терминах полезной грузоподъемности в зависимости от типов выполняемых заданий, чем учитывать предельные значения. При определении грузоподъемности необходимо учитывать инерцию нагрузки, силу тяжести и колебания в точках захвата. Эти факторы в значительной степени влияют на выбор конструкций захвата, запястья и приводов. Обычно грузоподъемность в большой степени зависит от предельного ускорения манипулятора и от предельных значений крутящих моментов, приложенных к запястью. Кроме того, нагрузка оказывает влияние на статическую структурную деформацию манипулятора, величину установившегося постоянного момента двигателей приводов, частоту собственных колебаний системы, затухание и выбор коэффициента передачи системы сервоуправления, обеспечивающих устойчивость.

4.2.2. Конфигурация системы

Конфигурация звеньев. Схема манипулятора определяется необходимыми перемещениями, системой управления, требованиями к обходу препятствий и структурными требованиями. Для манипуляторов, работающих в декартовой системе координат (с вращательными звеньями или без них), характерны простые уравнения управления и преобразования координат. Ортогональность осей поступательного движения упрощает расчет положения звеньев для заданной ориентации захвата. Уравнения управления тоже достаточно просты, поскольку звенья динамически независимы (до членов второго порядка). Управление манипулятором с вращательными звеньями обычно сложнее, но при равных рабочих пространствах оказывается проще. Обычно проще сконструировать и построить хорошее вращательное звено, чем поступательное звено с большим диапазоном перемещения. Манипуляторы с вращательными звеньями более удобны для организации совместной работы.

Окончательный выбор схемы манипулятора основывается на кинематических или структурных особенностях. Например, для обеспечения очень точного вертикального перемещения целесообразнее простое звено поступательного движения, чем два или три вращательных звена со сложной системой управления.

Число степеней подвижности. Несмотря на то что для обеспечения произвольного положения рабочего органа внутри рабочего пространства требуется не менее шести степеней подвижности, для выполнения простых или четко определенных заданий можно обойтись и меньшим их числом. Часто при выполнении задания можно исключить перемещения по определенным осям. Вообще говоря, добавление к системе еще одной степени подвижности увеличивает длительность цикла управления и снижает грузоподъемность и точность манипулятора.

Диапазон перемещений звена. Для конфигурации, построенной из вращательных звеньев, основной объем рабочего пространства определяется перемещениями в плечевом и локтевом сочленениях. За счет запястья обеспечивается изменение ориентации рабочего органа внутри этого объема. Расширяя диапазоны перемещения звеньев, можно увеличить число возможных конфигураций манипулятора, соответствующих данному положению рабочего органа, и число альтернативных способов достижения этого положения. Это свойство может оказаться очень полезным при работе в ограниченном пространстве или при наличии препятствий. Когда требуется непрерывное управление перемещением (например, прямолинейное перемещение) или синхронное перемещение (сопровождение транспортера), может оказаться полезной возможность разворота запястья на 360—720°. При обслуживании вращающегося механизма или при сборке деталей с резьбой используются запястья с неограниченным перемещением по углу крена (вращающиеся).

Система приводов. Как правило, звено манипулятора включает в себя четыре основных компонента: источник механической энергии, датчик обратной связи по положению звена, передачу и шарниры. Ниже рассматривается выбор этих основных компонент. При некоторых сочетаниях частоты цикла управления и полосы пропускания устройства управления можно использовать тахометр. Для цифровой системы сервоуправления звеном с шифратором в цепи обратной связи типовая частота цикла управления составляет от 200 до 2000 Гц. Если использовать тахометр и устройство управления скоростью с цепью аналоговой обратной связи, то при плавном перемещении можно обеспечить корректировку положения с частотой до 5 Гц. Для легких роботов требуется более высокая частота управления. Это объясняется их более высокой частотой собственных колебаний и большим затуханием механических и электрических компонент.

Для медленно перемещающихся манипуляторов (ускорение рабочего органа составляет менее половины ускорения свободного падения) инерция системы становится менее важной, чем моменты, обусловленные силой тяжести. При этом эксплуатационные свойства манипулятора можно улучшить с помощью уравновешивания моментов силы тяжести (посредством противовесов, пружин и воздушного давления). Для высокоскоростных манипуляторов значительно возрастает влияние инерции системы. Уменьшить инерцию системы и улучшить эксплуатационные характеристики манипулятора можно, поместив тяжелый привод в непосредственной близости от первой оси вращения или поступательного движения. В скоростных манипуляторах приходится выбирать между жесткими инерционными вращательными и нежесткими малоинерционными поступательными звеньями. В результате этого выбора определяются все основные физические характеристики манипулятора.

4.2.3. Технические характеристики манипулятора

Скорость. Максимальная скорость перемещения звена (угловая или линейная) является зависимой величиной. Обычно она ограничена напряжением в цепи сервоуправления или максимальной скоростью вращения двигателя. Для манипуляторов, перемещающихся с большим ускорением, ограничение скорости действует даже при малых перемещениях. Ограничение скорости для манипуляторов, перемещающихся с малым ускорением, действует только при больших перемещениях. Как правило, проектировщики руководствуются следующим принципом: большинство перемещений манипулятора должно производиться на скоростях, близких к предельным. Ниже учет ограничений скорости при проектировании рассмотрен подробнее.

Ускорение. Так как для большинства манипуляторов масса нагрузки мала по сравнению с массой самого манипулятора, то и бо́льшая часть энергии расходуется на ускорение самого манипулятора. Ускорение оказывает влияние на продолжительность больших перемещений и на продолжительность цикла (суммарное время перемещения плюс время затухания колебаний). Манипуляторы, способные развивать большие ускорения, должны обладать большой механической жесткостью. Для высокопроиз-

водительных манипуляторов предельное ускорение — более важная эксплуатационная характеристика, чем скорость и нагрузочная способность.

Точность повторного позиционирования. Этот параметр характеризует способность манипулятора многократно возвращаться в одно и то же положение. Большинство фирм — изготовителей роботов понимает под такой величиной радиус сферы, описанной вокруг совокупности точек конечного положения, в которые манипулятор попадает из одного и того же начального положения, при одинаковых нагрузках и начальных условиях под управлением одной и той же программы. Целевое положение может не входить в эту сферу. Погрешности округления, упрощенная калибровка, ограниченная точность и отклонения между исполнительными и обучающим циклами могут намного превышать погрешности, обусловленные трением, неучтенным люфтом звена и привода, постоянной погрешностью системы сервоуправления, погрешностью изготовления и сборки манипулятора. Разработчик промышленного робота должен правильно понимать смысл точности повторного позиционирования. Эта характеристика играет решающую роль при выполнении заданий, требующих многократных повторений точных движений (например, сборки без использования систем очувствления или загрузки станков). Значения точности повторного позиционирования могут лежать в диапазоне от 2 мм (для крупных роботов, предназначенных для точечной сварки) до 0,005 мм (для сверхлегких прецизионных роботов).

Разрешающая способность. Эта характеристика определяет величину минимального перемещения манипулятора. Она играет важную роль при совместной работе робота и подсистемы очувствления, а также при выполнении заданий, требующих точного позиционирования рабочего органа. Хотя большинство фирм рассчитывают значения разрешающей способности по техническим характеристикам датчиков положения, шифраторов и аналого-цифровых преобразователей, результат такого расчета может не отражать действительного положения дел, так как на разрешающую способность системы оказывают значительное влияние трение системы, скручивание, мертвый ход и кинематическая структура манипулятора. Разрешающая способность типового шифратора или датчика положения звена может колебаться от 2^{12} до 2^{20} отсчетов в полном диапазоне перемещения звена, но величина реальной разрешающей способности для вращательного звена колеблется от 2^{10} до 2^{18} положений, а для поступательного — от 0,2 до 0,002 мм. Реальная разрешающая способность типового многозвенного манипулятора обычно несколько хуже, чем разрешающая способность отдельных звеньев.

Точность. Этот параметр отражает способность робота установить рабочий орган в некоторое заданное положение в пространстве. Обычно предполагается преобразование из мировой системы координат в систему координат звеньев. Точность позиционирования зависит от точности математической модели манипулятора, заложенной в память управляющей ЭВМ (тип сочленений, длина звеньев, количественная оценка деформаций звеньев и сочленений под нагрузкой и т. д.), от адекватности моделей среды, инструмента и оборудования и от полноты и точности решения уравнений манипулятора. И хотя в большинстве языков программирования роботов высокого уровня имеются средства задания характеристик манипулятора, для ускорения вычислений используются идеализированная кинематическая модель и упрощенные алгоритмы. Таким образом, точность манипулятора зависит от степени соответствия реальных геометрических параметров робота его математической модели. Для улучшения соответствия выполняются калибрование, подстройка звеньев, юстировка сочленений и другие приемы. Точность робота особенно важна при выполнении повторяющихся заданий (когда при проектировании позиционная информация и задачи извлекаются из баз данных) и при корректировке геометрических параметров в ранее выполняющемся задании. Типовые величины точности манипуляторов могут колебаться в пределах от ±100 мм (для некалиброванных манипуляторов с упрощенной моделью в памяти ЭВМ) до ±0,01 мм (для манипуляторов типа станков с ЧПУ с простыми и точными моделями, точными алгоритмами определения управляющих параметров и высокоточной исполнительной частью).

Срок службы компонент и период рабочего состояния. Наименее надежные компоненты электромеханического робота — коллекторы и щетки двигателя, зубья шестерней передач (стирание и поломки) и соединительные кабели (перегибание). Для определения срока службы следует ориентироваться на выполнение повторяющегося задания в наиболее неблагоприятных условиях. Гарантийный ресурс по выполнению малых перемещений (менее 5 % диапазона звена) должен составлять не менее 20—50 млн. циклов. Гарантийный ресурс по выполнению больших перемещений (свыше 50 % диапазона звена) должен составлять от 1 до 20 млн. циклов. Среднее время наработки на отказ должно быть менее 2000 ч, а в идеале между заменами основных компонентов должно проходить не менее 5000 ч работы.

Для большинства манипуляторов длительность рабочего цикла много меньше времени перегрева электродвигателя. Типовые значения эксплуатационных характеристик ограничиваются максимальной нагрузкой на передачу, а нелинейные значения определяются тепловым режимом электродвигателя. Следует стремиться не к выравниванию пиковых и номинальных характеристик, а к обеспечению необходимого периода рабочего состояния — это поможет уменьшить затраты и повысить эффективность эксплуатации робота. В частности, можно использовать в манипуляторах двигатели и усилители меньшей мощности, чем это необходимо при стопроцентном периоде рабочего состояния. Для поддержания заданных условий работы могут использоваться температурные датчики.

В процессе работы манипулятора возможны непредвиденные столкновения манипулятора или рабочего органа с деталями или другими предметами, находящимися в рабочей зоне. Степень возникающих при этом повреждений во многом зависит от конструкции манипулятора. Если затраты времени и средств, необходимые на ликвидацию последствий столкновения могут быть значительными, то еще на ранней стадии разработки следует предусмотреть противоударные свойства конструкции. Как правило, столкновения ведут к трещинам или поломкам зубьев передач или валов, деформации и изгибам звеньев, срезанию шпонок шестерней или шкивов, обрывам, надлому или деформации проводов и кабелей, поломке контактов, арматуры и концевых выключателей.

4.3. Проектирование основных устройств

4.3.1. Структуры манипуляторов

Несмотря на то что все манипуляторы в той или иной степени обладают механической гибкостью, для различных типов роботов эта характеристика может сильно отличаться. Ниже рассматриваются структуры только двух типов: гибкая и жесткая. У жестких структур при решении кинематических уравнений и в управляющих алгоритмах все звенья предполагаются жесткими. Большинство серийно выпускаемых роботов имеют манипуляторы этого типа. Управление такими манипуляторами предполагает отсутствие структурных деформаций (хотя на практике при определенных нагрузках деформация манипулятора может быть значительной, что приведет к снижению точности).

Для некоторых роботов в алгоритмы управления вводится член, учитывающий деформацию под действием силы тяжести. В других, — для регистраций деформаций и нагрузок, используются тензометры. В таких «полужестких» манипуляторах малые структурные деформации под действием силы тяжести учитываются и компенсируются линейными корректирующими воздействиями.

Алгоритмы управления манипуляторами с гибкой структурой и управляющие алгоритмы учитывают гибкость отдельных звеньев. В настоящее время использование гибких манипуляторов не вышло за пределы исследовательских лабораторий; на производстве они изредка используются в качестве специализированного оборудования. Учет гибкости в промышленных «жестких» манипуляторах сильно усложняет алгоритмы управления. Вопросы управления манипуляторами подробно рассматриваются в ч. 3 настоящего справочника.

Важнейшими эксплуатационными характеристиками структуры манипулятора является сопротивление изгибанию и скручиванию. Наиболее распространены манипуляторы двух структурных типов: оболочечного и балочного. Оболочечные структуры дороже и сложнее в изготовлении, но они очень легкие и прочные. И хотя изготовленные методами литья, штамповки и механообработки балочные манипуляторы менее эффективны, чем оболочечные конструкции, они намного дешевле.

Важным этапом структурного проектирования является выбор способа изготовления манипулятора. Для сборки используются соединения на винтах, сварка или склеивание. Сборка на винтах — традиционный технологический прием, дешевый и простой в осуществлении, но у него есть ряд недостатков: неизбежное смещение и неплотное прилегание поверхностей в местах соединений, возможные изменения размеров в результате разборки и последующей сборки. Сварные и литые звенья менее подвержены деформациям гистерезисного типа, но в большинстве случаев они требуют дополнительной обработки (например, отпускания с целью снятия внутренних напряжений и шлифовки). Минимальная толщина стенок литого звена составляет 5 мм. Это несколько больше, чем необходимо для обеспечения прочности. Более тонкие стенки можно получить литьем под давлением или установкой вставок в форму, но при мелкосерийном производстве эти технологические процессы требуют слишком больших затрат. Для оболочечных структур минималь-

ная толщина стенок в большей степени определяется не структурными деформациями, а требованиями к прочности самого звена (например, во избежание пробоя при столкновении она не может быть слишком тонкой).

В настоящее время манипуляторы чаще всего изготовляются из алюминия и стали. Иногда используются термопластические материалы и пластмассы, армированные стекло- или углеволокном. При серийном производстве самыми дешевыми оказываются манипуляторы из пластмассы. Для снижения веса звеньев, изготовленных из алюминия и стали, им можно придать коническую форму.

Необходимость установки приводов и передач предъявляет дополнительные требования к конструкции манипулятора. Особенно важно правильно разместить подшипники передач, поскольку деформация звена в местах установки подшипников может в значительной степени снизить точность и нагрузочную способность звена, способствовать увеличению мертвого хода и люфта. Недостаточная жесткость звеньев манипулятора может оказать отрицательное влияние на его точность за счет изменения расстояний между осями передач и перекоса валов (что может привести к заклиниванию или возрастанию нагрузки на двигатель и приводы).

На конструкцию манипулятора оказывают влияние колебания температурного режима, обусловленные технологической средой и нагревом двигателей приводов. Меньше других чувствительны к колебаниям температуры стальные манипуляторы. Недостаточно учесть тепловое расширение элементов манипулятора, необходимо добиться согласованного температурного расширения всех его составляющих частей. Например, в стальных звеньях лучше использовать стальные подшипники. Это позволит избежать температурного дрейфа межцентрового расстояния, что было бы невозможно, если бы звено было изготовлено из алюминия. Кроме того, необходимо обеспечить жесткость крепления робота относительно остального оборудования технологической ячейки. Следует учитывать возможность локальных тепловых деформаций, вызываемых нагревом двигателей, передач, электронных устройств при захватывании раскаленных деталей. Чтобы предупредить нежелательные последствия, разработчик должен найти оптимальные варианты установки тепловыделяющих элементов. Влияние нагрева и силы тяжести на манипуляторы, изготовленные из пластмасс, сильно зависит как от типа пластмассы, так и от технологии изготовления звеньев манипулятора.

4.3.2. Сочленения

Сочленения звеньев манипулятора разделяются на два основных класса: поступательные и вращательные. Другие типы сочленений (сферические или универсальные) не рассматриваются, поскольку их можно представить в виде комбинации сочленений упомянутых двух классов.

Поступательные, или призматические, сочленения подразделяются на два типа: одинарные и телескопические. Одинарные сочленения представляют собой подвижную поверхность, линейно перемещающуюся по неподвижной поверхности. Телескопические сочленения представляют собой последовательность вложенных одинарных сочленений. Одинарные сочленения отличаются простотой конструкции и высокой жесткостью, а основным достоинством телескопических сочленений является их компактность в сложенном состоянии и способность удлиняться во много раз. Телескопические звенья обладают меньшей инерционностью, так как при перемещении часть звена может оставаться неподвижной.

Основная функция подшипников поступательных сочленений заключается в ограничении подвижности звена до линейной за счет блокирования всех остальных перемещений (как линейных, так и вращательных). Проектирование поступательного перемещения связано с решением сложных конструкторских задач. Деформация манипулятора может изменять форму поверхностей подшипников, что влияет на их эксплуатационные характеристики. В некоторых случаях деформация подшипника может привести к заклиниванию сочленения. В особо важных поступательных сочленениях направляющие должны устанавливаться с высокой точностью по всей длине звена. Прецизионная обработка их поверхностей может потребовать больших затрат. Для защиты и герметизации подшипников и направляющих необходимы специальные чехлы и экраны.

Основным критерием оценки качества поступательных сочленений служит отношение жесткости к весу. Использование полых движущихся звеньев позволяет улучшить это отношение. Жесткость сочленения зависит от расстояния между подшипниками. Если это расстояние мало, то жесткость сочленения будет недостаточной независимо от жесткости подшипников. Основные причины падения эффективности поступательных звеньев связаны с загрязнением поверхностей посторонними примесями и их продавливанием (деформации по Бринеллю) из-за превышения нагрузки на шарики подшипников и ударных нагрузок. Длительные перегрузки также могут привести к деформации поверхностей подшипников. Из-за большой площади точно обработанных поверхностей поступательные сочленения более чувствительны к условиям эксплуатации. Кроме того, они значительно сложнее в изготовлении, сборке и настройке.

Скользящие элементы, обеспечивающие поступательное движение, обычно представляют собой втулки из бронзы или фторопласта. Такие втулки дешевы, обладают относительно высокой устойчивостью к истиранию, могут работать как с обычными, так и с укрепленными (т. е. с хромированными) поверхностями. Эти втулки могут быть тонкостенными, поскольку давление равномерно распределяется по их поверхности. Иногда используются шариковые втулки. По сравнению с подшипниками скольжения они обеспечивают меньшее трение и бо́льшую точность. Однако при этом поверхности звеньев должны полностью или частично изготовляться из твердых материалов (обычно не менее HRC 55). Толщина стенок звеньев должна быть достаточно большой, чтобы выдерживать большие точечные нагрузки.

Кроме шариковых втулок в поступательных сочленениях используются линейные шариковые подшипники. В них шарики укладываются в направляющие канавки различной конфигурации. Различают линейные шариковые подшипники с циркуляцией шариков или без нее. Подшипники без циркуляции шариков используются тогда, когда нагрузка на сочленения невелика или мал диапазон перемещения звена. Для них характерны очень малое трение и высокая точность, малая нагрузочная способность и чувствительность к ударам. У подшипников с циркуляцией шариков точность несколько ниже, но они могут нести большую нагрузку. При равных длинах направляющих линейный подшипник с циркуляцией шариков обеспечивает большее перемещение звена, чем подшипник без циркуляции.

Довольно часто в конструкции поступательных сочленений используются стандартные шариковые или роликовые подшипники, контактирующие с гладкими поверхностями. Роликовые и игольчатые подшипники используются чаще, чем шариковые. В сочленениях, несущих большую нагрузку, контактирующие поверхности до окончательного полирования подвергаются упрочнению. Как правило, в сочленениях используется от 6 до 16 подшипников. Они устанавливаются на эксцентричной оси, вращая которую, можно регулировать положение относительно поверхности звена.

Иногда в поступательных звеньях используются упругие элементы и воздушные подшипники. При использовании упругих элементов псевдолинейное перемещение звена

возникает в результате упругих деформаций несущих его конструкций. Как правило, диапазон перемещения такого звена невелик.

Для обеспечения точного перемещения с помощью воздушных подшипников требуются высокая чистота обработки поверхностей и точное соблюдение допусков. В менее точных воздушных подшипниках могут применяться механически обработанные и даже литые поверхности, однако в этих случаях неизбежно появление зазоров, снижающих жесткость сочленения и увеличивающих расход воздуха. Для компенсации значительных нагрузок вдоль направляющих устанавливается несколько воздушных подшипников. Иногда некоторые из них заменяются шариковыми или роликовыми подшипниками.

Конструкция вращательных (шарнирных) сочленений должна обеспечивать вращение с минимальными отклонениями в радиальном и осевом направлениях. При конструировании вращательного сочленения возникает много конструкторских задач. Основной характеристикой вращательного сочленения является его жесткость (сопротивление всем нежелательным перемещениям). Жесткость сочленения определяется точностью изготовления валов, обойм и гнезд подшипников, схемой их размещения и способом предварительного напряжения. Размер подшипников не всегда определяется исходя из нагрузки: как правило, используются подшипники наименьшего размера, обладающие достаточной жесткостью на изгиб и скручивание. Поскольку валы сочленений часто используются для передачи крутящих моментов, они должны иметь запас прочности по изгибу и скручиванию. В качестве примера вращательного сочленения можно привести первое сочленение манипулятора ПУМА.

На жесткость вращательного сочленения оказывает большое влияние способ прикрепления подшипников в корпусе звена манипулятора. Конструкция крепления подшипника должна обеспечивать его предварительное напряжение. Предварительное напряжение шариковых и конических роликовых подшипников в радиальном направлении увеличивает точность и жесткость сочленения за счет уменьшения радиальных и осевых биений. Загрузка обеспечивается специальной сборкой, пружинами и резьбовыми цангами.

4.3.3. Приводы

В робототехнических системах чаще других используются три типа приводов: гидравлические, пневматические и электромеханические. Гидравлические приводы, ис-

пользовавшиеся еще в первых промышленных роботах, характеризуются большой мощностью и большим отношением развиваемой мощности к весу. В гидравлической системе источником энергии служит насос. Управление вентилями сервоуправления осуществляется электрическим сигналом малой мощности. Источники гидропитания, как правило, громоздки, их коэффициент полезного действия невысок, а стоимость быстродействующих пропорциональных вентилей довольно велика.

Пневматические приводы чаще всего используются в простейших манипуляторах. Обычно с их помощью выполняются неуправляемые перемещения, ограниченные стопорами. Эти приводы обеспечивают высокую скорость перемещений, просты в управлении и дешевы. К сожалению, к общезаводской сети можно подключить лишь несколько роботов. Если их использование будет расширяться, придется устанавливать дополнительные компрессоры, что требует больших затрат и дополнительной энергии.

Наиболее распространены электромеханические приводы (обычно в них используются электродвигатели постоянного тока). Каждому типу электродвигателей постоянного тока присущи свои достоинства и недостатки. В недорогих роботах в качестве привода чаще всего используется шаговый электродвигатель. Управление перемещением и его скоростью осуществляется по разомкнутому циклу. Для таких систем характерны малая стоимость и простота интерфейса с устройствами управления. Последние разработки в области систем управления позволили разбить каждый шаг электродвигателя на множество малых перемещений (свыше 10 000 малых перемещений за один оборот вала). Однако при таком позиционировании ухудшаются магнитные характеристики электродвигателя. Это может привести к неустойчивости системы управления и слабому затуханию колебаний. От этого можно избавиться с помощью механического демпфера или замыканием системы управления. Как правило, отношение мощность/вес у шаговых электродвигателей ниже, чем у других типов электродвигателей.

Широко используются электродвигатели постоянного тока с постоянными магнитами и щеточными коллекторами. Их номенклатура очень велика. Самым дешевым электродвигателем с постоянными магнитами является ферромагнитный (ферритовые магниты). При использовании для изготовления постоянных магнитов магнитных сплавов (алюминий, никель, кобальт) эксплуатационные характеристики (выходная мощность, постоянная электродвигателя) лучше, чем у аналогичного электродвигателя с ферритовыми магнитами. (Постоянная электродвигателя определяется как отношение величины развиваемого на валу момента к квадратному корню потребляемой мощности.) Лучшие постоянные магниты изготавливаются из сплавов редкоземельных металлов (самарий — кобальт). Они позволяют развивать очень высокие моменты на валу, так как магнитное насыщение не возникает даже при больших значениях рабочего тока. Однако большие токи приводят к быстрому износу щеток и перегреву электродвигателя.

Еще один тип коллекторных электродвигателей постоянного тока с постоянными магнитами составляют роторные электродвигатели с якорем из немагнитных материалов. Обычно якори таких двигателей изготовляются из медной обмотки, залитой эпоксидной смолой, или набираются из отдельных дисков. К достоинствам таких электродвигателей относятся малый момент инерции и незначительная индуктивность, что снижает искрение и продлевает срок службы коллектора. Поскольку в якоре электродвигателя не содержится магнитных материалов, остаточная намагниченность мала и, следовательно, они легко трогаются с места при запуске. Кроме того, дисковые электродвигатели имеют ряд преимуществ. Они имеют малые размеры, и, поскольку якорь электродвигателя составлен из большого числа сегментов, обеспечиваются плавность вращения и малые биения. Недостатком электродвигателей с немагнитными якорями является их низкая теплоемкость, обусловленная малой массой и ограниченным отводом теплоты. Как следствие этого, периоды работы таких двигателей строго ограничены, а при работе с большими моментами на валу требуется принудительное воздушное охлаждение.

Самым уязвимым местом большинства электродвигателей являются подшипники и коллекторы. Это привело к созданию бесколлекторных электродвигателей постоянного тока (иногда они называются синхронными электродвигателями переменного тока). В этих электродвигателях вместо графитовых щеток и медных коллекторных пластин используются магнитные или оптические переключатели, датчики и электронные блоки управления. В результате коллекторное искрение и износ коллектора исключаются, а трение сильно уменьшается. Бесколлекторные электродвигатели постоянного тока имеют хорошие эксплуатационные характеристики и сами по себе достаточно дешевы. Однако устройство управления такими двигателями, включающее в себя схему управления переключателями, может стоить довольно дорого. Повышенная надежность бесколлекторных электродвигателей постоянного тока и улучшенные тепловые характеристики привели к росту их использования. Улучшение тепловых характеристик достигается за счет отсутствия тепловыделяющих элементов в якоре. Обмотки электродвигателя перенесены в статор, что обеспечивает лучшее рассеяние теплоты.

4.3.4. *Передачи*

В манипуляторах роботов используются различные механические передачи. Передачи предназначаются для переноса механической энергии от привода к исполнительному органу. На выбор типа передачи оказывают влияние передаваемая мощность, вид перемещений и расположение источника механической энергии относительно звена. Важнейшими характеристиками передач являются жесткость, эффективность и стоимость.

В современной робототехнике наиболее распространенным элементом передачи является зубчатое колесо. При конструировании зубчатых передач определяются материал зубчатых колес, материал покрытия и точность изготовления. Должны быть определены такие параметры конструкции, как отношение передачи, тип зубчатых колес, способ установки осей, расстояние между их центрами и смазочный материал.

В передачах с параллельными осями или в часто встречающихся в поступательных звеньях реечных зубчатых передачах используются в основном цилиндрические зубчатые колеса. Достоинством цилиндрических прямозубых зубчатых колес является малая угловая нагрузка на ось, что позволяет снизить требования к установке осей.

Часто используются косозубые зубчатые колеса. Они обладают рядом достоинств. Поскольку в передачах манипуляторов передаточное отношение может быть значительным, то большое значение приобретает величина коэффициента сцепления зубьев шестерен. Винтовые передачи характеризуются лучшим значением коэффициента сцепления при заданных величине передаточного отношения и размере передачи и, как следствие этого, обеспечивают более плавное вращение. Уровень шума косозубых зубчатых колес ниже. Главным недостатком косозубых зубчатых колес является наличие угловых нагрузок на ось, которые заставляют усиливать ее крепление.

Жесткость передачи в целом ограничена жесткостью зубьев колес; каждый зуб, пока на него действует нагрузка, может рассматриваться как упругая консоль. Для увеличения жесткости необходимо увеличивать диаметр зубчатых колес. Способы определения передаточного отношения рассматриваются ниже.

В манипуляторах роботов часто используются зубчатые реечные передачи. В частности, они используются для осуществления простейших линейных перемещений, когда зубчатая рейка, приводимая в движение зубчатым колесом, крепится к звену и передает ему свое перемещение. Кроме того, линейные перемещения звеньев осуществляются с помощью шариковых ходовых винтов. Для них характерны малое трение, средняя жесткость и короткий шаг перемещения, что, с точки зрения конструктора, дает определенные преимущества. Ходовые винты делятся на прецизионные (полированные) и стандартные (прокатанные). Прецизионные ходовые винты поставляются в комплекте с шариковыми гайками. Обычно они обеспечивают точность не менее 1/50000, тогда как ходовые винты стандартного исполнения обеспечивают точность порядка 1/2000. Чтобы добиться наилучшей точности и уничтожить мертвый ход, шариковые гайки предварительно напрягают. Напряжение гаек выполняется с помощью заклинивающих шайб. При этом отклонение от заданной конфигурации компенсируется за счет упругой деформации деталей. В качестве упругих элементов в ходовых винтах стандартного исполнения используются пружинные шайбы, соединяющие предварительно напряженные половины шариковых гаек и обеспечивающие их незначительные перемещения друг относительно друга. В системе шарики — гайка — пружина может возникнуть вибрация. Возможны также угловые вибрации или скручивающие деформации винта, особенно если он имеет большую длину.

В передачах ангулярных манипуляторов часто используются волновые передачи. Входной и выходной валы таких передач соосны. Для них характерны компактность и высокие передаточные отношения. Можно изготовить волновые передачи с практически нулевым мертвым ходом. Волновые передачи отличаются высоким трением трогания, а из-за погрешностей изготовления может возникать периодическое возрастание трения при работе.

Часто передача механической энергии осуществляется вращающимся валом (для облегчения конструкции он может быть пустотелым). Передача мощности на больших угловых скоростях позволяет уменьшить диаметр вала и толщину его стенок, тем самым облегчая передачу. Следует учитывать усталость металла, особенно если для изготовления вала используется алюминий.

В некоторых манипуляторах используются зубчатые ремни. В основном они приме-

няются для передачи небольшой мощности на незначительные расстояния или для передачи вращательного движения от электрического двигателя на входной вал редуктора. Величина передаточного отношения при этом ограничена, так как для увеличения срока службы ремня используются шкивы достаточно больших диаметров.

Жесткость ременной передачи зависит от материала ремня и системы его натяжения. Для ремней, изготовленных из высококачественных волокнистых материалов (например, «Кевлар»), диаметр шкивов может быть меньше, поскольку укрепляющие ленты «Кевлар» состоят из гибких микроскопических волокон.

В простых роботах в качестве элемента передачи часто используется трос или плоская лента из легированной стали. Такие передачи легко устанавливать и ремонтировать, они достаточно эффективны. Жесткость тросов и лент, как и жесткость ремней, зависит от материалов, из которых они изготовлены. Кроме того, часто используются цепи. Они относительно дешевы и рекомендуются для работы при больших нагрузках. Недостатком цепных передач является их вес и быстрый износ. Во избежание провисания цепей под собственной тяжестью их приходится сильно натягивать. В результате провисания снижается жесткость системы. Чтобы избежать провисания, отдельные группы звеньев заменяются на цельные или пустотелые стержни. В роботах «Юнимейт» мод. 2000 и 4000 фирмы «Юнимейшн» и технологическом роботе фирмы «Хитачи» такими стержнями соединены сегменты цепи, охватывающие звездочки.

Гидравлические системы тоже могут рассматриваться как своеобразные передачи. Прочные толстостенные трубопроводы обеспечивают достаточно высокую жесткость. Гибкие трубки более универсальны, но при их использовании возможны потери жесткости, поскольку коэффициент упругости таких труб меньше, чем коэффициент упругости рабочего тела. Гидравлические системы используются для передачи мощности на большие расстояния. Эксплуатационные характеристики системы ограничены вязкостью жидкости, перепадом давлений и временными характеристиками трубопроводов.

Кулисные механизмы и их группы тоже можно рассматривать как передачи, хотя они являются также и структурными элементами. Их основным достоинством является то, что передаточное отношение переменно и зависит от конфигурации элементов. Поскольку жесткость элементов механизма обычно достаточно велика, то жесткость системы в целом ограничивается жесткостью соединяющих их сочленений.

Важной технической характеристикой передачи является ее коэффициент полезного действия. Большинство используемых в манипуляторах передач имеют высокий КПД при номинальном или близком к нему уровне мощности. Если передаваемая мощность составляет лишь несколько процентов от номинала, то КПД передач с высоким трением покоя (таких как, волновая передача с малым мертвым ходом или ременной привод с напряженными подшипниками и сильно натянутым ремнем) падает. Кроме того, при выборе передач необходимо учитывать структуру манипулятора и стремиться к компактности и простоте. Наиболее компактными являются планетарные и волновые передачи. Наиболее просты в изготовлении ременные, цепные и тросовые передачи.

При выборе передач необходимо учитывать время, необходимое для их настройки и установки. Для устранения мертвого хода следует регулировать расстояния между осями зубчатых колес. Ходовые винты с шариковыми гайками требуют особо точной установки. При установке ремней, лент, тросов и цепей требуется регулировка их натяжения роликами или изменением расстояния между валами. Уничтожение мертвого хода в волновых передачах достигается селективной сборкой и подгонкой расположения компонент.

В большинстве роботов используются пластичные смазочные материалы. Применение смазочных материалов других типов затруднено, поскольку конфигурация и ориентация звеньев меняется, происходит частая смена направлений перемещений, их скорость относительно невелика. Если не допускать перегрева передач, пластичная смазка достаточно эффективна во всех случаях.

Различные передачи обеспечивают разную плавность хода исполнительного органа. Эта характеристика играет важную роль в тех случаях, когда необходимо медленное перемещение (например, при дуговой сварке). Самое равномерное перемещение обеспечивают ременные передачи и кулисные механизмы. Ходовые винты также обеспечивают равномерное перемещение при условии, что они в хорошем состоянии и не засорены. Зубчатые передачи не дают такого равномерного перемещения, как ходовые винты и ремни, однако они передают движение более плавно, чем цепные и волновые передачи. Для равномерности хода зубчатой передачи с помощью шестерен, необходима ее регулировка.

Как правило, если требуется большое передаточное отношение, то используются волновые и зубчатые передачи или ходовые винты. Для малых передаточных отношений можно использовать реечные зубчатые передачи, реечные зубчатые передачи без редуктора, а также ременные, тросовые и цепные передачи. Кроме того, в последнее время стали использоваться тихоходные двигатели, части которых непосредственно связаны со звеньями манипулятора.

4.3.5. *Соединительные кабели и магистрали*

Прокладка проводов, кабелей и трубопроводов, в звеньях основания и плеча обычно не вызывает трудностей, поскольку эти звенья и соответствующие им сочленения имеют бóльшие размеры и к ним имеется свободный доступ. Труднее выполнить прокладку в звеньях запястья, однако в большинстве случаев ее удается выполнить внутри звеньев. Использование широких подшипников и полых валов большого диаметра обеспечивает достаточную жесткость, малый вес и достаточное пространство для прокладки кабелей и магистралей. При этом необходимо точно определить длины гибких участков и винтов внутри звена. Возможно применение высокопрочных гибких плоских кабелей. Для манипуляторов с трехзвенным запястьем прокладка силовых кабелей, сигнальных проводов и магистралей сжатого воздуха к рабочему органу затруднена в силу сложности и компактности конструкции. Поэтому во многих роботах эти коммуникации проложены снаружи манипулятора. Однако при этом длина коммуникаций увеличивается, и с их стороны воникают помехи при работе. Следует иметь в виду, что пользователи робота тоже вынуждены прокладывать все кабели и магистрали снаружи манипулятора, хотя такая практика повсеместно считается порочной.

Для защиты от помех большинство сигнальных и силовых кабелей экранируется. Обычно к звену или к рабочему органу подводится три или четыре экранированных кабеля, а именно: цепь шифратора, цепь двигателя, цепь тахометра и цепь концевых выключателей. Кабели соединяются в жгуты и присоединяются к устройству управления через один или несколько многоштырьковых разъемов на основании робота.

4.4. Алгоритмы расчета приводов и передаточных отношений

Правильность расчета приводов и передач оказывает решающее влияние на скорость выполнения заданий роботом. В любой механической системе имеются ограничения (например, максимальная скорость вращения двигателя, максимально допустимое ускорение). Ниже рассматривается влияние приводов и передач на технические характеристики робота.

4.4.1. *Максимальное ускорение манипулятора при ограниченном усилии, развиваемом приводом*

Для того чтобы достигнуть максимального ускорения манипулятора, необходимо правильно выбрать величину передаточного отношения. Типовая механическая система с одной степенью подвижности состоит из источника силы или момента, передачи и инерциальной нагрузки. На рис. 4.1 изображен вариант такой системы: электродвигатель постоянного тока и ходовой винт. В общем случае инерциальную нагрузку можно рассматривать как массу (если звено поступательное) или как момент инерции (если звено вращательное). Для систем с переменными геометрическими характеристиками (например, робот ПУМА) момент инерции манипулятора относительно сочленения является функцией ориентации звеньев. При конструировании таких систем считается, что максимальное ускорение системы достигается в окрестности центра рабочего пространства. Пусть в рассматриваемой модели (см. рис. 4.1) источник вращения имеет момент инерции J и развивает крутящий момент M. Передаточное отношение r определяется как отношение выходной скорости вращения к входной скорости. Для цилиндрической зубчатой передачи отношение r определяется как отношение выходной угловой скорости к входной угловой скорости. Для ходового винта r определяется как отношение выходной скорости поступательного движения к входной угловой скорости в радианах в секунду. Для зубчатой реечной передачи r также определяется как отношение выходной скорости поступательного движения к

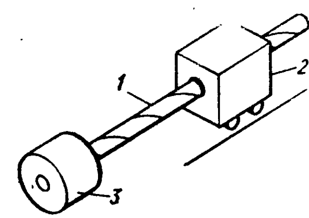


Рис. 4.1. Простейшая модель сервосистемы: *1* — передаточное отношение r (мм/рад); *2* — движущаяся масса M; *3* — инерциальная масса J источника энергии

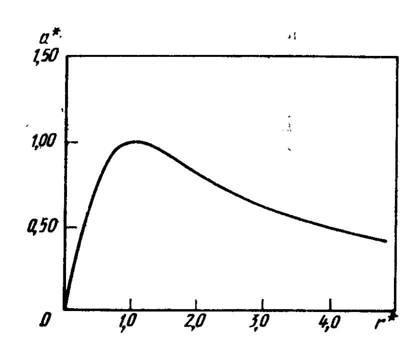


Рис. 4.2. Зависимость развиваемого системой ускорения от выбора величины передаточного отношения:

a^* — нормализованное ускорение, r^* — нормализованное передаточное отношение

входной угловой скорости и по величине равно радиусу начальной окружности шестерни.

При проектировании высокоскоростного оборудования необходимо максимизировать ускорение системы на выходе — a. Уравнение движения системы имеет вид:

$$T=\left(\frac{J}{r}+Mr\right)a. \qquad (4.1)$$

Может быть найдено такое значение r, при котором выражение в скобках будет иметь наименьшее значение, при этом для заданного крутящего момента привода ускорение будет максимальным:

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{J}{r}+Mr\right)=-\frac{J}{r^2}+M=0$$

или

$$r'=\sqrt{\frac{J}{M}}. \qquad (4.2)$$

В этом уравнении r' есть такое передаточное отношение, при котором для заданного крутящего момента привода достигается максимальное ускорение. Отметим, что прн подстановке в уравнение (4.1) вместо r значения r' момент инерции и движущая масса будут в равной степени «тормозить» движение. При таком выборе значения r получается система, сбалансированная по механическому сопротивлению. На рис. 4.2 приведена зависимость a^* от r^*. Величины a^* и r^* являются безразмерными параметрами и определяются как

$$r^*=\frac{r}{r'}; \qquad (4.3)$$

$$a^*=\frac{a}{a_{\max}}, \qquad (4.4)$$

где из уравнения (4.1) при $r=r'$

$$a_{\max}=\frac{T/\sqrt{J}}{2\sqrt{M}}. \qquad (4.5)$$

Из рис. 4.2 видно, что a^* мало зависит от вариаций r^*, если r примерно равно r'. Однако a^* быстро убывает при уменьшении r^*. Из уравнения (4.5) видно, что максимальное ускорение системы $a_{\max}$ пропорционально величине $T/\sqrt{J}$. Следовательно, можно сделать вывод для выбора оптимального передаточного отношения: чтобы при введении более мощного двигателя в систему получить большее ускорение, процентное увеличение величины развиваемого им момента должно быть больше, чем процентное увеличение значения $\sqrt{J}$.

Некоторые приводы (например, электродвигатель постоянного тока с усилителем тока) обеспечивают постоянную величину выходного момента. Он не зависит от угловой скорости вращения (если скорость не превышает предельных значений). Для остальных приводов велнчнна момента является функцией угловой скорости ω. В последнем случае максимальное ускорение в системе достигается при величине передаточного отношения, рассчитанного по уравнению (4.2) при всех значениях угловой скорости ω. Разумеется, наибольшее ускорение будет достигнуто при значении ω, соответствующему максимальному моменту T.

4.4.2. Влияние массы нагрузки на скоростные характеристики

Пусть $M=M_c+M_p$ — сумма массы исполнительного органа и массы нагрузки. На рис. 4.3 изображены зависимости характеристик системы от величины передаточного отношения r^* при разных значениях M_p. На графике также изображена кривая значений предельных ускорений в

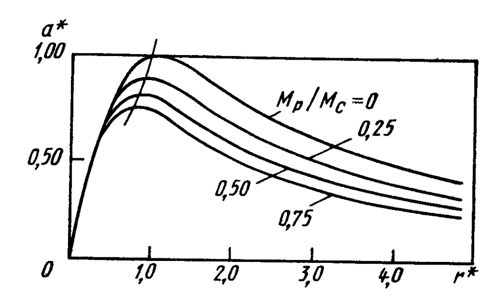


Рис. 4.3. Зависнмость характеристик системы от величины движущейся массы

зависимости от изменения величины M_p/M_c. Из графиков видно, что оптимальная величина передаточного отношения в диапазоне малых значений отношения M_p/M_c меняется незначительно. Это благоприятное обстоятельство, поскольку в большинстве систем передаточное отношение трудно изменить в процессе функционирования. Из рис. 4.3 видно, что при $r^*<0{,}4$, ускорение системы при заданной величине момента практически не зависит от M_p/M_c. Это позволило упростить управление манипулятором, используя режим работы с малыми значениями r^*. Как видно из графиков, при этом наблюдается значительное ухудшение скоростных характеристик.

4.4.3. Выбор двигателя, обеспечивающего максимальное ускорение

Уравнение (4.5) выражает количественную зависимость ускорения системы от величины развиваемого приводом момента и инерции. Предположим, что инерция элемента передачи J_s мала по сравнению с инерцией двигателя J_m. Тогда уравнение (4.5) для случая оптимальной величины передаточного отношения можно переписать в виде:

$$\frac{T}{\sqrt{J_m}}\sim 2a_{\max}\sqrt{M}. \qquad (4.6)$$

На рис. 4.4 изображены зависимости момента инерции ротора от крутящего момента для нескольких типов двигателей, размеры (и стоимость) которых отличаются по величине более чем на два порядка. Величины T и J_m взяты из промышленных каталогов. На основанни уравнения (4.6) можно изобразить на графике прямую, соответствующую величине $a_{\max}\sqrt{M}$. Если известна движущаяся масса системы, то ускорение системы для каждого двигателя можно определить непосредственно по графику. На рис. 4.4 для движущейся массы величиной 23 кг построены линии постоянного ускорения вплоть до величины $6G$.

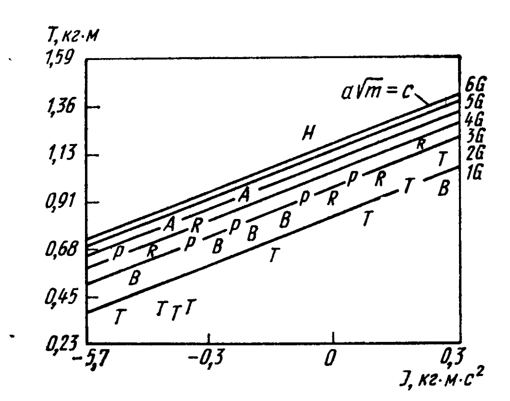


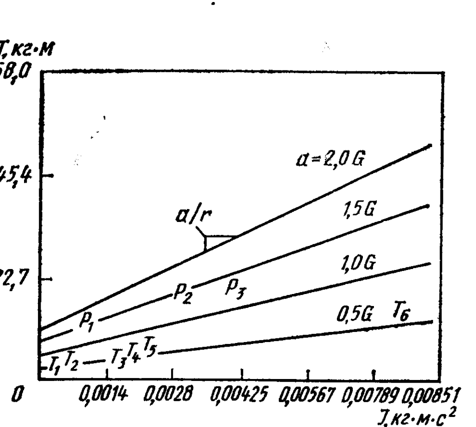
Рис. 4.4. Характеристики системы при использовании различных электродвигателей. Буквы на графиках обозначают типы промышленных двигателей:

T — роторный; B — бесщеточный; P — плоский; A — пневматический; H — гидравлический; R — редкоземельный

Из графиков на рис. 4.4 видно, что для большинства типов двигателей более мощные двигатели не дают значительного увеличения ускорения. Получается, что самые крупные из рассматриваемых коллекторные двигатели обеспечивают наименьшее ускорение. Тем не менее в использовании крупных двигателей есть определенное преимущество. Поскольку они обладают большим моментом инерции J, для получения максимального ускорения будут выбираться [по уравнению (4.2)] бóльшие значения r'. А для большего значения r', предельная скорость движущейся нагрузки при заданной предельной угловой скорости вращения двигателя будет выше.

После того как выбрана передача и определен ее момент инерции J_s, по графику на рис. 4.4 можно определить величину ускорения системы. В результате добавления момента инерции J_s точка, задающая верхнее ограничение для двигателя, сдвинется. Таким образом, ордината J будет представлена суммой двух моментов инерции J_s и J_m. Для заданной величины J_s характеристики системы будут более стабильными при бóльших значениях J_m.

В результате уточнения величины J из-за добавления J_s увеличится величина r'. В некоторых случаях это изменение величины r' может потребовать изменения геометрических размеров передачи (вследствие конструкторских ограничений), что приведет к увеличению момента инерции J_s. В таких случаях для оптимального выбора величины J_s и r' приходится пользоваться итеративной процедурой. Следует отметить, что для таких передач, как передача с ходовым винтом, величину передаточного отношения можно получить только в дискретных приращениях. Это не является серьезным недостатком, поскольку, как отмечалось ранее (см. рис. 4.2), характеристики системы практически не зависят от малых изменений величины r в окрестности оптимального значения $r=r'$.



ис. 4.5. Характеристики различных двига-елей в системе с постоянным передаточ-ым отношением

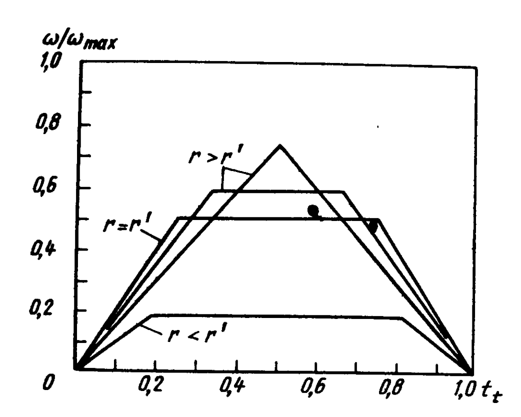


Рис. 4.6. Типовые графики скоростей произвольных перемещений

4.4.4. *Выбор электродвигателя для заданной системы*

Часто конструктор не может рассчитать се параметры системы. Проще решается адача выбора двигателя в качестве приода уже существующей системы. В этом лучае значения J_s, r и M известны и осовное уравнение системы записывается в иде:

$$T = ac_1J_m + ac_2, \tag{4.7}$$

де

$$c_1 = \frac{1}{r}, \quad c_2 = \frac{J_s}{r} + Mr.$$

Из уравнения видно, что момент, неободимый для получения заданного ускореия, является линейной функцией момента нерции электродвигателя.

На графиках зависимостей крутящего омента от момента инерции электродвиателя (рис. 4.5) нанесены прямые потоянного ускорения. Из уравнения (4.7) идно, что при замене электродвигателя а другой, обеспечивающий большее ускоение нагрузки, необходимо, чтобы при том увеличение момента в (a/r) раз ревышало увеличение J_m. Следовательно, ри увеличении ускорения системы, чем ольше величин начального ускорения a, ем больше должно быть приращение T ри заданном приращении J_m.

4.4.5. *Определение оптимального передаточного отношения для систем с ограниченной скоростью*

Максимизация ускорения не является арантией, что система будет иметь оптимальные характеристики при любых перемещениях. Максимальная скорость (r-кратная ω_{max}) может быть достигнута в кратчайший промежуток времени, но выбор величины передаточного отношения может искусственно ограничить эту предельную скорость при заданной предельной скорости двигателя или угловой скорости передачи.

Рассмотрим графики скорости произвольного перемещения (рис. 4.6). Это перемещение может выполняться с помощью электродвигателя постоянного тока с постоянной величиной момента вращения и предельной скоростью вращения ω_{max}. Следует отметить, что при $r = r'$ наклон в начале и в конце ломаной линии будет самым крутым. Площадь, ограниченная ломаной, численно равна пройденному расстоянию. Если система работает со скоростью ниже предельной, то передаточное отношение, при котором время перемещения будет минимальным, $r = r'$. Если система работает с предельной скоростью, то величина $r = r'$ не определяет оптимального отношения. Отметим, что при $r < r'$ наклон графика скорости к оси времени уменьшается, как и величина максимальной скорости. Поэтому при $r < r'$ площадь под ломаной для данного отрезка времени будет всегда меньше. При r, несколько бо́льших r', площадь под ломаной увеличивается по мере возрастания r. Начиная с некоторого значения r площадь начинает уменьшаться.

Для некоторого перемещения, при котором достигается максимальная скорость, время перемещения t_t составит:

$$t_t = \frac{\omega_{max}(J + Mr^2)}{T} + \frac{d}{r\omega_{max}}, \tag{4.8}$$

где d — расстояние полного перемещения. Взяв от этого уравнения частную производную по передаточному отношению, получим

$$\frac{\partial t_t}{\partial r} = 0 = \frac{2rM\omega_{max}}{T} - \frac{d}{\omega_{max}r^2}$$

или

$$r_{opt} = \sqrt[3]{\frac{Td}{2M\omega_{max}^2}}, \tag{4.9}$$

где r_{opt} — величина передаточного отношения, при котором время, необходимое для выполнения заданного перемещения, минимально (если система работает на предельной скорости $\omega = \omega_{max}$).

Как правило, для манипуляторов роботов, управляемых ЭВМ, невозможно определить длину перемещения, можно только ограничить его диапазон. Для таких систем передаточное отношение выбирается из расчета минимального времени выполнения задания в пределах диапазона заданных перемещений. Поскольку оптимальное отношение пропорционально кубическому корню от величины перемещения, то можно подобрать отношение, близкое к оптимальному для достаточно большого диапазона длин перемещений.

4.5. Заключение

Проектирование механической части манипулятора представляет собой итеративный процесс оценки и выбора конструкторских и технических решений, связанных с различными инженерными дисциплинами. Окончательный выбор конструкции должен основываться на конкретных особенностях задания, а не на общих соображениях. Ключ к достижению целей проектирования лежит в правильном определении и понимании этих особенностей. При проектировании и выборе конкретных узлов должны рассматриваться различные варианты. Довольно часто к проектированию манипулятора подходят, как к разработке статичной жесткой конструкции, но это не всегда дает удовлетворительные результаты. Необходимо учитывать механическую жесткость системы, частоту собственных колебаний, возможности системы управления и свойств отдельных узлов. И хотя конкретные конструкторские решения могут основываться на алгоритмах, но многообразие факторов, которые приходится учитывать при проектировании манипуляторов, крайне осложняет эту работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

D. C. Motors, Speed Controls, Servo Systems, third edition, Electro-Craft Corporation, Hopkins, Minnesota.
Design and Application of Small Standardized Components, Stock Drive Products, New Hyde Park, New York, 1983.
Glegg, Gordon L., *The Design of Design*, Cambridge University Press, 1979.
Metals Handbook, ninth edition, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1978.
Paul, R. P., *Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control*, The M. I. T. Press, Cambridge, MA, 1981.
Pieper, D. L., and Roth, B., The Kinematics of Manipulators under Computer Control, Proceedings of the 2nd International Congress on the Theory of Machines and Mechanism, Vol. 2, 1969, pp. 159—168.
Roth, B., Performance Evaluation of Manipulators from a Kinematic Viewpoint, *Performance Evaluation of Programmable Robots and Manipulators*, National Bureau of Standards Special Publication 459, pp. 39—62.
Seering, W. P., Directions in Robot Design, *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 1, March 1983.
Shigley, Joseph E., and Mitchell, Larry D., *Mechanical Engineering Design*, fourth edition, McGraw-Hill, 1983.
Source Book on Gear Design Technology and Performance, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1983.
Spotts, M. F., *Design of Machine Elements*, fifth edition, Prentice-Hall, 1978.
Sunada, W., and Dubowsky, S., On the Dynamic Analysis and Behavior of Industrial Robotic Manipulators with Elastic Members, *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 1, March 1983.
Yang, D. C. H., and Lee, T. W., On the Workspace of Mechanical Manipulators, *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 1, March 1983.

Глава 5

УСТРОЙСТВО МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Г. Варнеке, Р. Шрафт, М. Уоннер,
Институт технологии и автоматизации Фраунхофера,
г. Штутгарт, ФРГ

5.1. Устройство промышленного робота

5.1.1. Кинематика

Традиционное назначение промышленно-го робота заключается в перемещении объ-екта (детали или инструмента) внутри ра-бочей зоны не более чем по шести степе-ням подвижности (трем поступательным и трем вращательным) с изменением ориен-тации. Требования к кинематической схе-ме определяются сложностью выполняемых операций.

Промышленный робот представляет со-бой кинематическую цепь, состоящую из шарниров и звеньев. Количество независи-мых управляемых ведущих осей, необхо-димых для перемещения тела в простран-стве в заданном направлении, определяет-ся числом степеней подвижности системы. В кинематической схеме робота выделяют-ся следующие части.

Манипулятор. Представляет собой после-довательность связанных сочленений и звеньев, несущих запястье или рабочий ор-ган. Манипулятор обеспечивает движение по каждой из осей. Одна ось обеспечи-вает движение по прямой, две оси задают движение по плоскости, три оси и более задают движение в рабочем пространстве.

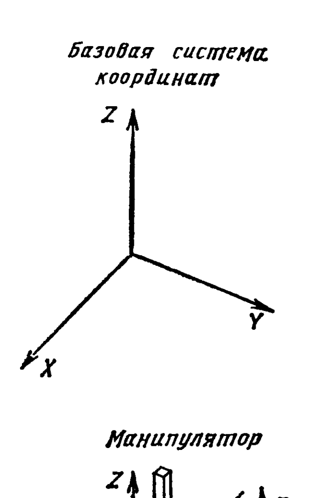
Запястье. Представляет собой последова-тельность звеньев между манипулятором и рабочим органом, предназначенных для ориентации последнего относительно дета-ли. Запястье служит для изменения ориен-тации и корректировки положения рабоче-го органа.

На рис. 5.1 указаны системы координат при выполнении задания роботом. В базо-вой системе координат определяется поло-жение робота и в большинстве случаев на-чальные положения звеньев и запястья. В системе координат, связанной с инстру-ментом выражаются параметры положе-ния инструмента по 6 степеням подвиж-ности (*X*, *Y*, *Z* и *A*, *B*, *C*).

Робот, манипулятор и запястье связывают базовую систему координат с системой координат инструмента.

5.1. Символические обозначения узлов промышленных роботов

Наименование	Символическое обозначение	Схематическое обозначение
Поступательное звено (телескопическое)	*X*, *Y*, *Z*	
Поступательное звено (поперечное)	*U*, *V*, *W*	
Вращательное звено (осевое)	*A*, *B*, *C*	
Вращательное звено (шарнирное)	*D*, *E*, *P*	
Захват	—	
Инструмент	—	
Разделение манипулятора и запястья	/	
Наличие у робота нескольких независимых кинематических цепей	Начало (Конец)	—



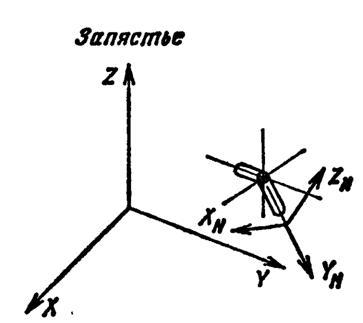


Рис. 5.1. Определение систем координат при выполнении задания роботом

Различаются оси нескольких типов.

Ось вращательного движения представ-ляет собой такое соединение двух жест-ких элементов, когда один из них может вращаться относительно второго вокруг фиксированной оси.

Ось поступательного движения представ-ляет собой такое соединение двух жест-ких элементов, когда один может дви-гаться прямолинейно по другому элементу.

Сложное сочленение представляет собой такое соединение двух жестких элементов, когда один из них может вращаться отно-сительно другого вокруг подвижной оси.

В табл. 5.1 приведены используемые в настоящей главе схематические обозначе-ния. Кинематическая схема может быть составлена из осей поступательного и вра-щательного движения. Возможно также использование сложных сочленений. На рис. 5.2 показан пример кинематической схемы [1]. Число возможных вариантов по-строения промышленного робота опреде-ляется следующим образом [2]:

$$V = 6^{DF},$$

где V — число вариантов; DF — число сте-пеней подвижности. Очевидно, что число возможных вариантов построения кинема-тических цепей огромно, например, для

5.2. Критерии и примеры неприемлемых кинематических схем

Критерий	Пример
Последовательное соединение звеньев одного типа	
Невозможно осуществить изменение ориентации запястья	
Изменение ориентации достигается в результате сложных перемещений звеньев манипулятора и запястья	

1DOF C	2DOF CB	3DOF CBR	4DOF CBR/E	5DOF CBR/EP

Рис. 5.2. Варианты кинематических схем

.3. Типовые схемы построения манипуляторов и запястий промышленных роботов

Манипулятор			Запястье		
Внешний вид	Кинематическая схема	Рабочее пространство			
			<		
					—
				—	—

5.4. Функциональные зависимости типа выполняемых операций, числа программно управляемых осей и типа системы управления роботом от схемы манипулятора

Задание / Кинематическая схема													Более 3-х осей
Перемещение *A* и *B*	Ориентация к поверхности	Число программно управляемых осей											
		PTP	*CP*	*PTP*	*CP*	*PTP*	*CP*	*PTP*	*CP*	*PTP*	*CP*	*PTP*	*CP*
	Нет	1	Не треб.	1	Не треб.	2*B*	2*A*	1*A*	2*B*	Не исп.	2	Не исп.	2
	dx	2	Не треб.	2	Не треб.	3*B*	3*A*	2*A*	3*B*	Не исп.	3	Не исп.	3
	dx, *dy*	3	Не треб.	3	Не треб.	4*B*	4*A*	3*A*	4*B*	Не исп.	4	Не исп.	4
	dx, *dy*, *dz*	4	Не треб.	4	Не треб.	5*B*	5*A*	4*A*	5*B*	Не исп.	5	Не исп.	5
						CP		*CP*					
	Нет	[2]	2	Не исп.	—	3*A*	2*B*	3*A*	2*B*	Не исп.	3	Не исп.	3
	dx	[3]	3	Не исп.	—	4*A*	3*B*	4*A*	3*B*	Не исп.	4	Не исп.	4
	dx, *dy*	[4]	4	Не исп.	—	5*A*	4*B*	5*A*	4*B*	Не исп.	5	Не исп.	5
	dx, *dy*, *dz*	[5]	5	Не исп.	—	6*A*	5*B*	6*A*	5*B*	Не исп.	6	Не исп.	6
	Нет	Не исп.	3	Не исп.	3	Не исп.	3	Не исп.	3	Не исп.	3	Не исп.	3
	dx	Не исп.	4	Не исп.	4	Не исп.	4	Не исп.	4	Не исп.	4	Не исп.	4
	dx, *dy*	Не исп.	5	Не исп.	5	Не исп.	5	Не исп.	5	Не исп.	5	Не исп.	5
	dx, *dy*, *dz*	Не исп.	6	Не исп.	6	Не исп.	6	Не исп.	6	Не исп.	6	Не исп.	6

Примечание. Не треб. — не требуется; не исп. — не используется, не имеет практического значения; [ ] — используется в некоторых обстоятельствах.

6 осей возможно 46 656 вариантов. Однако большинство из них неприменимо по кинематическим соображениям. В табл. 5.2 приведены критерии и примеры неприемлемых кинематических схем.

Дополнительные ограничения вызываются следующими причинами.

Точность позиционирования уменьшается с увеличением числа звеньев.

С увеличением числа звеньев значительно увеличивается объем вычислений, необходимых для управления движением по траектории.

Добавление нового звена вызывает дополнительные затраты (цепь питания, тормоз, двигатель, датчик положения, управление приводом, память).

С увеличением числа звеньев усложняется энергоснабжение.

В настоящее время число осей подвижности ограничивается. Обычно промышленный робот имеет до четырех осей манипулятора и три оси в запястье. В табл. 5.3 приведены наиболее распространенные схемы. С развитием механики роботов и систем управления ожидается появление новых удачных кинематических схем.

Выбор системы управления роботом (цикловое или контурное) и числа программно управляемых осей зависит от выбора кинематической схемы.

В табл. 5.4 [3] приводится зависимость типа выполняемых операций, числа программно управляемых осей и типа системы управления роботом от схемы манипулятора. Таблица подчеркивает основную закономерность проектирования роботов: применение звеньев поступательного движения требует сложных механических устройств (см. разд. 5.10) и достаточно простой системы управления. Для робота, построенного на звеньях вращательного движения, — наоборот. Таким образом, выбор кинематической схемы — важный этап проектирования механической части и системы управления роботом.

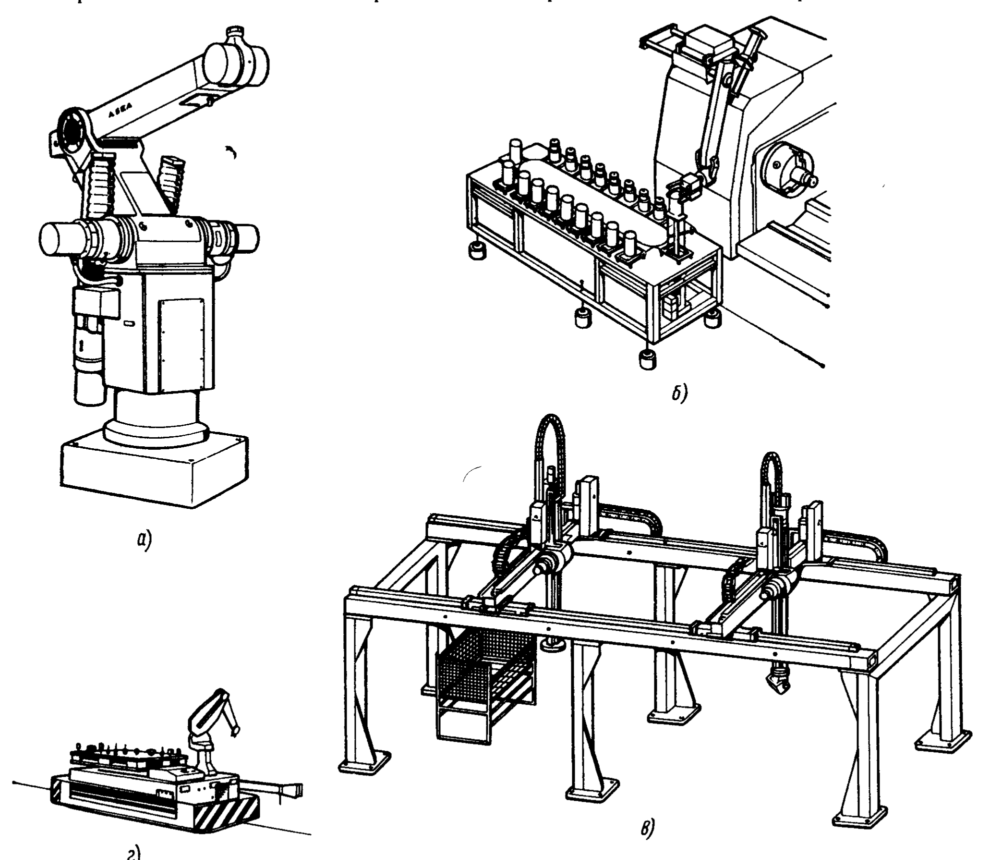


Рис. 5.3. Варианты установки промышленных роботов:
а — установка на фундаменте; *б* — консольная установка; *в* — мостовая установка; *г* — подвижный робот

5.1.2. Вариант установки

Промышленные роботы различаются также по типу установки.

При установке на полу основание робота закрепляется на фундаменте. В зависимости от конструкции, производится подключение кабельного распределителя, энергетической и топливной систем и т. д.

При консольной установке робот и обслуживаемый им механизм образуют одно целое.

Мостовая установка используется в случаях, когда требуется обеспечить очень большое рабочее пространство или когда некоторые операции (например, захват высокого ящика, сложные сварочные операции) не могут быть выполнены при неподвижной установке робота. Обычно для преобразования стационарно установленного робота в мостовую установку в его кинематическую схему вводится дополнительное поступательное звено.

Новое направление развития промышленных роботов связано с появлением свободно перемещающихся по плоскости роботов. Одно из направлений развития предполагает установку робота, системы управления и магазина на управляемой тележке.

В будущем могут появиться самые разнообразные системы. На рис. 5.3 изображены различные варианты (*а* — *б*) установки роботов. Во всех случаях вариант установки зависит от кинематической схемы.

5.2. Специализация конструкции робота

Архитектура робототехнических систем во многом определяется технологией роботизируемого производства. Ниже приводятся особенности построения робототехнических систем для некоторых важнейших областей применения.

5.2.1. Окраска распылением

При проектировании робота-маляра должны учитываться следующие критерии [4].

Обычно окрашиваемая поверхность имеет сложную конфигурацию. Окраска должна производиться под определенным углом к поверхности. Следовательно, требуется высокая подвижность кинематической цепи.

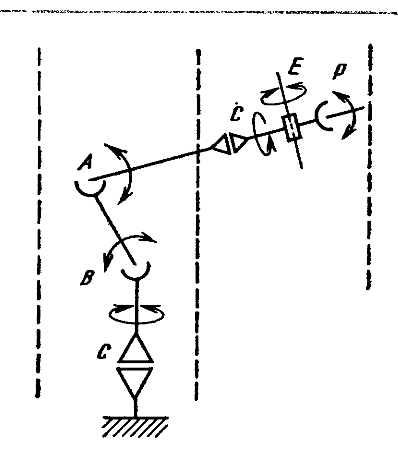


Рис. 5.4. Пример кинематической схемы шестизвенного робота-маляра

Ошибки в окраске углов поверхности приводят к наложениям (утолщениям покрытия). То же самое происходит и при резком изменении скорости движения.

Поскольку программирование робота обычно выполняется проводкой по нужной траектории, важно, чтобы в пределах рабочего пространства для этого не требовались значительные усилия.

Может потребоваться сопровождение движущегося транспортера.

Для робота-маляра желательны упрощенная схема обучения и в большинстве случаев контурное управление. Из соображений безопасности используются гидроприводы. Они обеспечивают быстрый разгон и торможение (рис. 5.4).

5.2.2. Точечная сварка

При проектировании робота для точечной сварки должны учитываться следующие особенности:

а) быстрые разгон и торможение;

б) механическая подвижность (как правило, наличие не менее пяти программно управляемых осей);

в) высокая подвижность узлов;

г) точечная сварка обычно производится в большом рабочем пространстве и связана с большими нагрузками;

д) возникают трудности при подведении электропитания к рабочему органу;

е) точность повторного позиционирования не хуже 1 мм на видимых швах и не хуже 3 мм на невидимых швах;

ж) чтобы избежать столкновений, обычно требуется длинное и тонкое предплечье.

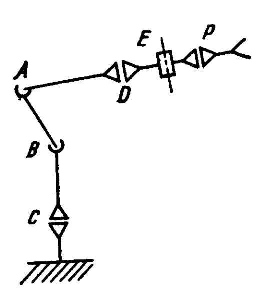


Рис. 5.5. Внешний вид и кинематическая схема робота, используемого при точечной сварке (с разрешения фирмы АСЕА)

Выполняющие точечную сварку роботы устанавливаются по тельферной схеме, на фундаменте или по комбинированной схеме. На рис. 5.5 изображен типовой сварочный робот.

5.2.3. *Дуговая сварка*

Основные особенности роботов для дуговой сварки заключаются в следующем.

По мере необходимости они должны использовать информацию от внешних датчиков.

Из-за сложной конфигурации сварочных швов, предплечье должно отклоняться как в положительном, так и в отрицательном направлениях.

В большинстве случаев требуется контурное управление. Возможно использование интерполяции (например, дуговой).

Скорость сварки должна быть высокой.

Возможно использование поворотного устройства подачи деталей.

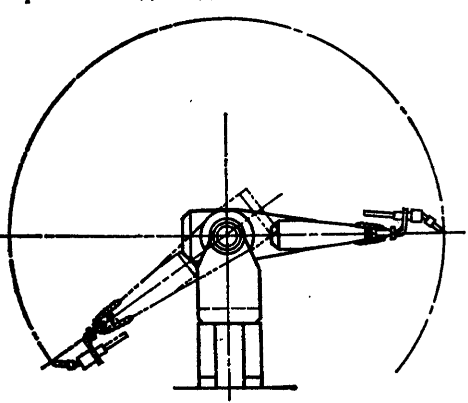


Рис. 5.6. Внешний вид и кинематическая схема робота, используемого при дуговой сварке (с разрешения фирмы «Юнгхейнрих»)

Необходимы простые и удобные алгоритмы вычисления зависимости силы тока сварки и напряжения сварки, скорости подачи электрода и скорости сварки.

Для дуговой сварки чаще используются небольшие роботы (рис. 5.6). Дальнейшие разработки идут в направлении создания переносных устройств.

5.2.4. *Сборка*

Требования к сборочным роботам существенно отличаются от перечисленных выше:

а) масса собираемых деталей обычно мала (не более 1 кг);

б) продолжительность цикла очень мала;

в) требуется высокая точность позиционирования (не хуже 0,1 мм);

г) как правило, перемещения деталей происходят в малом рабочем пространстве параллельно осям *X*, *Y*, *Z*.

Сегодня трудно выделить четкое направление развития промышленных сборочных роботов. Видимо, долгое время будут пользоваться спросом недорогие манипуляторы, работающие по принципу «поднять и положить» (пневматические, с одним или двумя программно управляемыми звеньями). Широкое распространение получили сборочные роботы со звеньями поступательного движения.

5.2.5. *Перемещение деталей*

Перемещение детали промышленным роботом заключается в переносе ее из одной точки в другую с принудительным ориентированием. Ниже перечислены основные области использования и их отличительные особенности.

Обслуживание пресса. Очень короткий технологический цикл. Специальное изготовление, использование декартовых координат. Вопросы установки и зоны обслуживания решаются в каждом конкретном случае применения.

Обслуживание кузнечного пресса. Высокая скорость движения и тяжелые детали. Робот должен быть защищен от пыли, тепла и ударов. Рекомендуется установка на основании.

Обслуживание литейного оборудования. Установка обычно по мостовой или тельферной схеме. Продолжительность цикла для машинного литья под давлением меньше, чем для литья в постоянные формы. Обычно для задания операции используется простой язык программирования. Изменения программ производятся достаточно редко. Высокая точность позиционирования. Необходимость защиты от тепла и пыли.

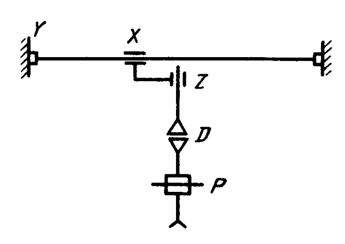


Рис. 5.7. Внешний вид и кинематическая схема робота с мостовой установкой для переноса деталей (с разрешения фирмы ДЮРР)

Обслуживание станков. Высокая точность позиционирования, малая длительность цикла и, зачастую, тяжелые детали. Использование простого языка программирования.

Роботы для переноса деталей и материалов часто устанавливаются по мостовой и тельферной схеме (рис. 5.7).

5.3. Содержание и основные этапы процесса проектирования

Ниже приводится обзор основных этапов процесса проектирования робота [5].

5.3.1. *Организационная структура*

Есть смысл четко разграничить различные области инженерных исследований и установить связи между группами разработчиков на ранней стадии. Обычно выбираются следующие направления работ.

Группа 1 — проектирование механической части. Выполняет следующие функции:

а) выбор кинематической схемы, расчет сил и моментов;

б) проектирование системы приводов, передачи, системы датчиков (положения и скорости), тормозов;

в) конструирование звеньев;

г) разработку подсистем пассивного очувствления.

Группа 2 — управление роботом и язык программирования:

а) разработка систем управления роботом, управления приводами, обработки информации;

б) операционная система и интерпретатор программ, разработка языка программирования;

в) создание интерфейса с механической системой, внешней ЭВМ и датчиками.

Группа 3 — разработка систем очувствления и обработки внешней информации.

5.3.2. *Этапы процесса проектирования*

Определение целей разработки, создание и отладка робототехнических систем требуют не только наличия новых идей и научных знаний, но и способности реализовать их в виде методики. В начале разработки полезно четко сформулировать последовательность этапов. Основные этапы проектирования механической системы перечислены ниже.

а. Анализ передового опыта, изучение продукции конкурентов и потребностей рынка.

б. Изучение рынка, определение потребностей на основе технического анализа и приближенное определение важнейших особенностей технологии производства.

в. Определение последовательности разработки. Создание подробного сетевого графика со сроками.

г. Составление эскизных проектов на структурном уровне. Их оценка по методу весовых коэффициентов.

д. Разбиение конструкции на узлы. Выбор возможных решений.

е. Синтез конструкции из узлов. Расчет затрат по различным вариантам решений. Выбор основного варианта и переход к рабочему проектированию.

ж. Заказ покупного оборудования и параллельно с этим проверка важнейших ранее не использовавшихся компонент.

з. Проверка всей системы на тестовом стенде. Исправление ошибок.

и. Доводка системы, создание эксплуатационной документации.

к. Начало промышленного производства.

Ниже рассматриваются основные этапы процесса проектирования.

5.4. Требования, определяемые при анализе рабочего места

Обычно анализу подвергается уже существующее рабочее место. Рабочий выполняет определенные операции с помощью имеющегося технологического оборудования. Предметом исследования являются регламент и характер этих операций. Наиболее удачный подход был предложен Германном [6, 2]. Эта процедура выдержала успешную проверку несколькими западногерманскими фирмами и Институтом промышленной автоматизации. Основные этапы процедуры следующие:

а) подробный анализ рабочего места и
еющегося на нем технологического обо-
дования;
б) разработка и оценка альтернативных
стемных решений;
в) анализ требований к робототехниче-
ой системе (включая периферийное обо-
дование).
Проектировщик робототехнической си-
емы должен иметь следующие данные:
личество и массу обрабатываемых дета-
й, необходимые перемещения в рабочей
не, конфигурацию рабочего пространства
учетом периферийных устройств), точ-
сть позиционирования, частоту перена-
роек технологического оборудования,
ункции датчиков распознавания и кон-
оля качества, варианты используемых
хватов и инструмента, номенклатуру опе-
ций механообработки (например, свер-
ния), перечень требуемого периферийно-
оборудования, полное описание техноло-
и производства (см. разд. 5.2).
Опыт показывает, что должно быть об-
едовано не менее 100 рабочих мест. К со-
алению, изготовители роботов зачастую
енебрегают этими дорогими и трудоем-
ими исследованиями.

5.5. Составление описания робототехнической системы

На следующем этапе должен быть опре-
лен набор рабочих характеристик. Их
жно разбить на несколько групп:
а) обязательные характеристики, которые
всех случаях должны быть соблюдены;
б) предельные характеристики (ограниче-
ия, которые не должны превышаться);
в) желательные характеристики.
В рабочем описании системы до начала
проектирования должны быть отражены,
к минимум, перечисленные ниже сведе-
ия:
а) тип перемещений и кинематическая
ема;
б) геометрические параметры;
в) скорости и ускорения относительно
ей;
г) система приводов и система управле-
ия;
д) точность позиционирования.
С увеличением полноты рабочего описа-
ия системы резко сокращается число воз-
жных вариантов ее реализации. С точки
ения разработчика во многих случаях
о весьма желательно.

5.6. Подготовка к системному проектированию

Системное проектирование не следует
льно детализировать, поскольку возмож-ные решения могут отыскаться на разных направлениях. Назначение этого раздела — акцентировать внимание проектировщика механической части системы на особенностях данного этапа.

5.6.1. Геометрическая подвижность

При заданном рабочем пространстве геометрическая подвижность определяет способность робота придавать рабочему органу различные положения при фиксации центра инструмента [7]. На рис. 5.8 [7] приведен пример рабочего пространства (внешняя кривая) для робота с тремя звеньями. Область, в которой манипулятор может принять горизонтальную ориентацию, заштрихована. Геометрическая подвижность очень важна. Проектировщик может изменить рабочие характеристики, выбирая различные кинематические схемы и меняя длины звеньев.

5.6.2. Согласование кинематической схемы и устройства управления

После определения точек пересечения разработчик кинематической схемы может передать полезную информацию разработчикам устройства управления. Чтобы избежать лишних вычислений при решении прямой или обратной задачи, оси должны пересекаться в одной плоскости, а оси запястья — даже в одной точке. В противном случае возникают зоны, в которых уравнения преобразования координат сингулярны или имеют неоднозначное решение [8].

5.6.3. Силы и моменты

Для проектировщика структуры робота очень важно определить функциональные

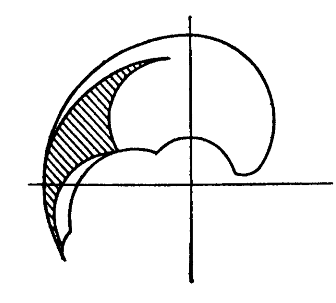


Рис. 5.8. Пример конфигурации рабочего пространства

зависимости сил и моментов, возникающих в звеньях, от типа кинематической схемы и возможных перемещений манипулятора. Наиболее часто приходится решать следующие две задачи: уравнение Лагранжа для системы, состоящей из не более чем четырех звеньев [9, 10], и уравнение Ньютона — Эйлера для более общего случая [11].

В некоторых случаях в этих моделях можно учитывать влияние трения. Исходные данные для этого должны получаться экспериментально. В некоторых кинематических схемах и при определенной нагрузке учет трения может стать необходимым.

Другим важным фактором является функциональная зависимость сил и моментов от кинематической схемы. Для поступательного звена движение оси практически независимо, напротив, для вращательных звеньев возникают нелинейные зависимости от кориолисовых, центростремительных и гравитационных сил. Влияние этих параметров на существующие погрешности описано [12].

5.6.4. Выбор материалов

При проектировании необходимо решить, какие материалы будут использоваться. Манипулятор может быть прочным и легким. В настоящее время волокнистые армированные пластмассы (см., например, [14]) вытесняют сплавы стали и алюминия. Эти материалы обладают многими достоинствами: высокой упругостью, высоким коэффициентом демпфирования, малым весом (в четыре раза легче стальных сплавов и в три раза легче алюминиевых).

Следует отметить и их недостатки: уменьшение прочности при нагреве и повышении влажности, значительные трудности при формировании сложных поверхностей, сложность соединения звеньев, очень высокая стоимость.

Учитывая сказанное выше и пользуясь методом конечных элементов, можно значительно снизить вес манипулятора. Следует иметь в виду, что перечисленные способы сокращения веса затрагивают лишь 30—50 % общей массы манипулятора, так как они не касаются приводов, шестерней, передач. Кроме того, использование армированных пластмасс сдерживается их высокой стоимостью.

5.7. Декомпозиция процесса проектирования

Важным шагом в процессе проектирования механической части является правильный выбор ее составных частей.

5.7.1. Выбор приводов

Тип системы приводов во многом определяет свойства как механической части робота, так и его устройства управления.

Пневматическая система приводов. Это недорогая, простая и механическая прочная конструкция, обеспечивающая быстрые перемещения при малом собственном весе. Однако в этом случае сложно реализовать точное позиционное управление. Используется в роботах с механическими стопорами, применяемых на подаче деталей, и в некоторых звеньях сварочных роботов, имеющих малый диапазон перемещений.

Гидравлическая система приводов. Она позволяет развивать большую мощность при малых размерах и собственном весе, что особенно важно применительно к запястью. Передача энергии осуществляется достаточно просто, более того, при этом удается достичь высоких ускорений. Основные недостатки заключаются в утечках, высокой стоимости гидравлического насоса, трении, перепадах температур, большой потребляемой мощности и иногда сложности устройства управления.

Электромеханическая система приводов. Основными ее преимуществами являются широкий диапазон управления скоростью, высокая надежность и простота восстановления после отключения силового питания.

Ниже перечислены основные типы электродвигателей и их характеристики.

Двигатель постоянного тока. Требует применения редуктора, позволяющего развить большие моменты на малых скоростях, датчиков положения и системы позиционного управления. Такая система привода часто используется в промышленных роботах. Основной недостаток связан с наличием мертвого хода в редукторе. Для непосредственного привода без применения редуктора могут использоваться двигатели, имеющие большое значение крутящего момента. Такие системы используются в основном в запястье и постоянно совершенствуются.

Шаговый двигатель. Управление им производится путем задания числа шагов, которые следует выполнить для перехода в заданное положение. Стоимость его невысока, так как датчики положения не требуются. При больших значениях момента и заклинивании возможна «потеря» шагов. В таких случаях необходимо введение обратной связи, что вызовет значительное увеличение стоимости.

Трехфазный двигатель. Управление скоростью осуществляется через изменение частоты. Это довольно дорого, но позволяет избавиться от редукторов.

На рис. 5.9 изображены схемы наиболее

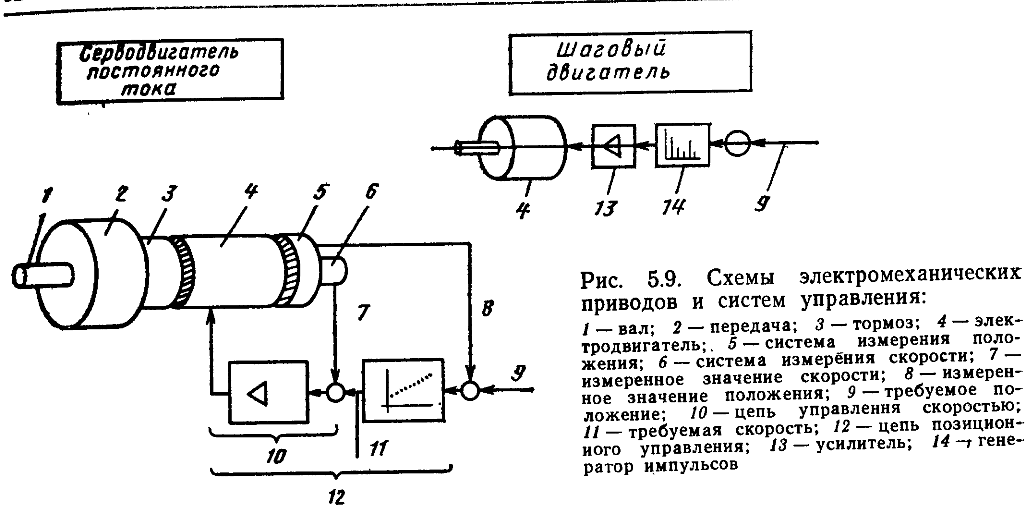


Рис. 5.9. Схемы электромеханических приводов и систем управления:

1 — вал; *2* — передача; *3* — тормоз; *4* — электродвигатель; *5* — система измерения положения; *6* — система измерения скорости; *7* — измеренное значение скорости; *8* — измеренное значение положения; *9* — требуемое положение; *10* — цепь управления скоростью; *11* — требуемая скорость; *12* — цепь позиционного управления; *13* — усилитель; *14* — генератор импульсов

распространенных приводов: двигателя постоянного тока с редуктором и шагового двигателя. Использование электромеханического привода дает следующие преимущества: надежность всей системы, высокое значение стартового момента, малый момент инерции, снижение затрат из-за упрощения механической части робота, слабый нагрев и хорошее рассеивание тепло-ты, возможность управления скоростью.

Из соображений безопасности приводы манипулятора могут быть снабжены тормозами.

5.7.2. Выбор внутренних датчиков

Датчики положения, входящие в состав механической системы, предназначены для непрерывного измерения положения звеньев по всем степеням подвижности в виде смещений от исходного положения. Эти значения используются в качестве исходных данных на этапе задания программы (обучения) и управляющих воздействий в автоматическом режиме.

Разрешающая способность датчиков положения оказывает влияние на точность позиционирования, что тесно связано с особенностями механической схемы: жесткостью конструкции, мертвым ходом и погрешностью реверса, которые следует соотносить с разрешающей способностью и линейностью датчиков положения. Существуют поступательные (потенциометр, ультразвуковой датчик) и вращательные (датчик положения звена, оптический шифратор абсолютных смещений и инкрементный шифратор) датчики. Совместное использование датчиков и системы приводов предполагает два варианта установки первых:

а) непосредственно на осях, соответствующих степеням подвижности. При этом поступательное движение оси часто преобразуется во вращательное движение датчика;

б) косвенно, на осях приводов (см. рис. 5.9). При этом могут компенсироваться ошибки мертвого и обратного ходов.

Данные наиболее распространенных датчиков положения приведены в табл. 5.5.

5.7.3. Передачи

Основные функции передач заключаются в следующем.

а. Преобразование перемещений: поступательного во вращательное (П/В) или вращательного в поступательное (В/П).

б. Преобразование скорости при преобразовании движения: вращательного во вращательное (В/В), поступательного движения в поступательное (П/П), В/П и П/В.

Важную роль играют следующие характеристики:

а) величина передаточного отношения и малые моменты инерции и размеры;

б) люфты в подшипниках и погрешности реверса;

в) масса;

г) срок службы и простота обслуживания;

д) эффективность передачи мощности на расстояние, портативность.

В табл. 5.6 перечислены традиционные передачи, их основные характеристики и области применения [15].

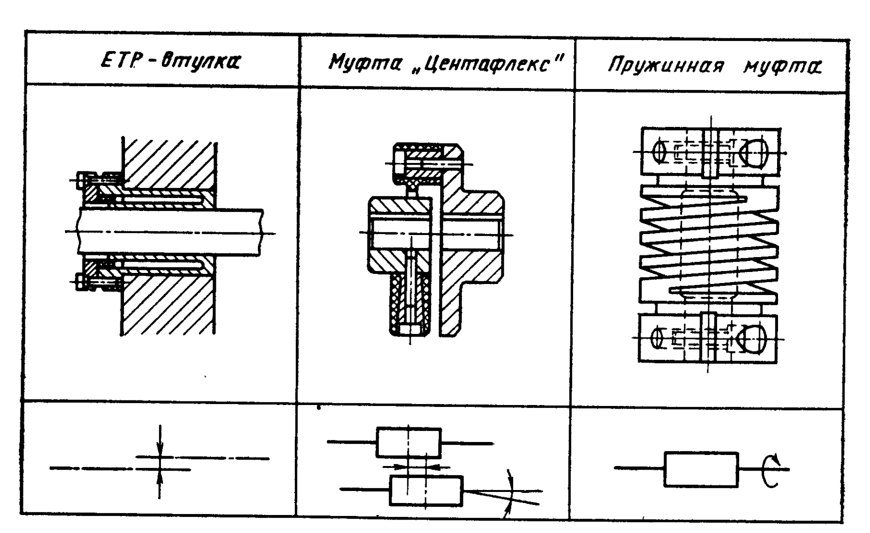


Рис. 5.10. Примеры компонент передач с минимальным мертвым ходом

5.7.4. Подшипники

Обычно подшипники и направляющие находятся под большой нагрузкой. Как правило, для вращательных осей используются конические роликовые подшипники или фланцевые подшипники, ориентированные по направлению оси. Перекосы устраняются установочными винтами при сборке.

Минимизация люфтов в подшипниках нужна для уменьшения погрешностей позиционирования, реверса и слежения. Подробнее эти погрешности и способы их измерения рассматриваются в гл. 10.

5.7.5. Муфты

Использование неподходящих муфт может привести к серьезным неприятностям. При выборе вариантов необходимо учитывать следующие требования:

а) погрешность реверса должна быть минимальна;

б) муфта должна иметь минимальный вес и быть, по возможности, недорогой;

в) уровень вибраций и перегрузок в приводах должен быть минимальным;

г) муфты не должны нуждаться в техническом обслуживании.

Обычно используются следующие виды соединений [16].

***ЕТР*-втулка.** Применяется в основном при малых моментах и возможной несоосности валов. Втулка надевается на вал. Посредством фланцев обеспечивается постоянное среднее сжатие вала. Возможна передача больших крутящих моментов.

Муфта «Центафлекс». Тепловое расширение и деформация подшипников могут вызвать перекос соединения двух валов, что увеличивает трение в подшипниках. Его можно предотвратить с помощью муфты «Центафлекс»: обладающей податливостью в осевом и радиальном направлениях и высокой жесткостью к моменту вращения.

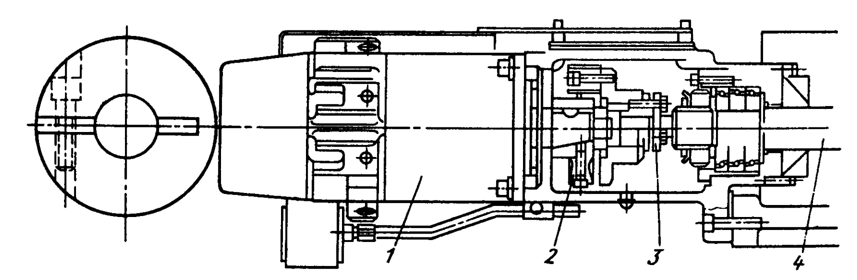


Рис. 5.11. Пример использования в системе привода *ЕТР*-втулки и муфты «Центафлекс»:
1 — электродвигатель постоянного тока; *2* — муфта «Центафлекс»; *3* — *ЕТР*-втулка; *4* — вал

5. Типовые датчики положения

Тип датчика	Тип сигнала	Принципиальная схема	Контрольная точка	Разрешающая способность	Достоинства	Недостатки
			Анало	*говые*		
отенциометр	Абсолютная величина; Сигнал; Смещение	Резистор; Скользящий контакт	Фиксирована	$\frac{\Delta L}{L} \sim 10^{-3}$	Недорогие Малые габариты	Линейность Контактные измерения Механическая ненадежность
льтразвуко-й датчик	Абсолютная величина; Сигнал; Смещение	Приемник; Импульс; Магнит; Магнитострикционный провод; Передатчик; Ультразвуковой импульс	Фиксирована	$\frac{\Delta L}{L} \sim 2 \cdot 10^{-4}$	Большой диапазон измеряемых перемещений Непосредственный способ измерений	Дороговизна Сложность обработки
атчик положения звена	Приращение; Сигнал; Смещение	Обмотка статора; R2; R4; Ротор; S4; S2; S1; S3; Обмотка статора	Не определена	$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} \sim 7 \cdot 10^{-3} \div 10^{-5}$	Надежность Простота конструкции Малая стоимость	Затруднено преобразование сигнала в цифровую форму Неопределенность представления информации
			Цифро-	*вые*		
птический ифратор абсолютных смещений	Циклическая абсолютная величина; Сигнал; Смещение	Диск с разметкой в абсолютных значениях; Источники света; Фотоэлементы; Вал шифратора; Электронный интерфейс; Выходной сигнал (абсолютная величина положения)	Фиксирована	$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} \sim 10^{-3} \div 10^{-5}$	Удобство представления угла поворота Высокая разрешающая способность Не увеличивает погрешность	Ограниченный диапазон измеряемых перемещений или резкое увеличение стоимости
птический	Абсолютная величина; Сигнал; Смещение	Диск с разметкой в значениях приращения; Источник света; Линза; Индексная пластинка; Вал шифратора; Фотоэлемент	Не определена	$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} \sim 4 \cdot 10^{-3}$	Неограниченный диапазон измерений Малая стоимость Простота конструкции	Увеличение погрешности Использование вращающегося размеченного диска Отклонения в режиме импульсного управления

5.6. Типовые системы передач

Тип передачи	Принципиальная схема	Характеристики	Преобразование перемещений	Преобразование скорости	Передача на расстояние	Применение
Цилиндрическое зубчатое колесо		Первое вращательное звено манипулятора Большие величины моментов	В/В	Есть	Нет	Манипулятор
Коническое зубчатое колесо		Специальное применение при фланцевом монтаже	В/В	Есть	Нет	Манипулятор
Червячная передача		Высокое передаточное отношение Большой вес Учет теплового режима	В/В	Есть, высокое	Нет	Манипулятор Запястье Захват
Планетарная передача		Дороговизна Большой вес	В/В	Есть, высокое	Нет	Манипулятор
Волновая передача		Очень высокое передаточное отношение Малые габариты и вес	В/В	Есть, очень высокое	Нет	Манипулятор Запястье
Цепная передача		Нет мертвого хода и вибрации Большой вес	В/В; П/В; В/П	Возможно	Есть	Модуль скольжения
Зубчатая ременная передача		Мертвый ход и вибрация возможны Очень малый вес	В/В; П/В; В/П	Возможно	Есть	Запястье Захват
Боуденовский трос		Используется при передаче на расстояние Осевое натяжение	В/В; П/В; В/П	Нет	Есть	Запястье
Четырехзвенное соединение		Используется для точной передачи энергии на расстояние	В/В	Возможно	Есть	Манипулятор
Скользящее коленчатое соединение		Специальное применение	В/П; П/В	Нет	Есть	Манипулятор Запястье
Винтовой ходовой вал		Высокое передаточное отношение Требуется учитывать трение	В/П	Есть, высокое	Есть	Запястье
Шариковый ходовой винт с замкнутым циклом и гайка		Высокое передаточное отношение Очень высокие точность и надежность Высокая стоимость	В/П	Есть, очень высокое	Есть	Манипулятор Запястье
Зубчатая реечная передача		Точность Малая стоимость	В/П; П/В	Есть	Есть	Манипулятор Запястье Захват
Цилиндр		Гидравлические и пневматические системы могут быть изготовлены в различных вариациях	П/П	Есть	Есть	Манипулятор Запястье Захват

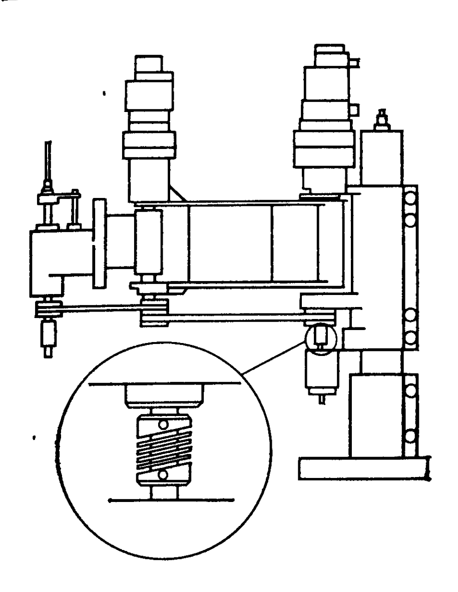


Рис. 5.12. Пример использования пружинной муфты в системе привода с шаговым электродвигателем

Пружинная муфта. В системах с переменными моментами и вибрацией для соединения привода и датчиков положения целесообразно использовать пружину. Пружинная муфта передает постоянное вращение при высоких скоростях без погрешностей реверса.

На рис. 5.10 изображены перечисленные муфты и приведены их основные характеристики. На рис. 5.11 показаны соединения двигателя постоянного тока через втулку *ETP* и муфту «Центафлекс» со шпинделем поступательного звена манипулятора. При этом разрывается канал передачи теплоты, гасятся вибрации и биения, а также упрощаются сборка и разборка. На рис. 5.12 изображен пример использования пружинной муфты в сборочном роботе агрегатной гаммы СКАРА. Она соединяет шаговый двигатель с цепной передачей, меняющей ориентацию звена манипулятора.

5.8. Рабочее проектирование

После выполнения эскизного проекта и оценки отдельных устройств необходимо рассчитать затраты на оборудование для различных вариантов технологической реализации одной функции. После выбора наилучшей с точки зрения рабочих характеристик альтернативы можно приступать к подробному рабочему проектированию.

Можно разделить этот процесс на проектирование запястья и манипулятора. При проектировании запястья необходимо учитывать следующие особенности:

а) число степеней подвижности, возможность использования дополнительных осей, варианты захвата;

б) точки пересечения осей вращения запястья. Возможность избежать ненужных преобразований в системе управления роботом;

в) подвижность запястья и захвата. Согласование захвата с манипулятором;

г) типы передач и систем сервоуправления по осям;

д) состав системы приводов;

е) направление силовых и сигнальных цепей;

ж) удобство в эксплуатации. Одно- или двухосевое запястье менее удобно для выполнения различных заданий, чем трехосевое.

При проектировании манипулятора необходимо обратить внимание на следующее:

а) зависимость механической жесткости по осям от люфта подшипников, мертвого хода, трения и износа привода;

б) конкретную конфигурацию рабочего пространства манипулятора с запястьем и захватом;

в) возможность использования активных и пассивных средств уравновешивания;

г) состав системы приводов;

д) прокладку цепей силового питания.

В качестве примера рассмотрим подробно общее проектирование «технологического робота» фирмы «Хитати». Необходимо было обеспечить любую ориентацию запястья в рабочей зоне механическими средствами. Ставилась задача упростить систему управления роботом и увеличить скорость его работы.

Схема манипулятора изображена на рис. 5.13. Вращательное звено *1* установлено на основании. Два других звена манипулятора *2* и *3* образуют параллелограмм. Звено *3* связано с рычагом *6*, обеспечивающим движение параллелограмма. Запястье приводится в движение цепными передачами *4*. Построение манипулятора по схеме параллелограмма с цепными передачами обеспечивает сохранение ориентации звена *5*.

Симметричность механической схемы также позволяет упростить устройство управления. Все оси манипулятора пересекаются в одной плоскости, а оси запястья — в одной точке.

Применение эластичных муфт в системе приводов и амортизаторов в цепных передачах позволяет построить систему с малой погрешностью реверса. В рассмотренной схеме защита от вибраций обеспечивается амортизаторами в системе приводов запястья *5* и параллелограммным построением манипулятора. Размещение основных приводов вблизи основания робота позволяет уменьшить момент инерции манипулятора. Иногда собственный вес системы приводов используется для уравновешивания конструкции (например, в роботе КУКА *IR100*, см. рис. 5.14).

Запястье построено по простейшей схеме с двумя степенями подвижности. На рис. 5.14 изображена его схема. Звено разворачивается относительно своего предшественника цепной передачей *1*, а звено *P* разворачивается относительно звена *E* цепной передачей *2* и коническими шестернями *3*.

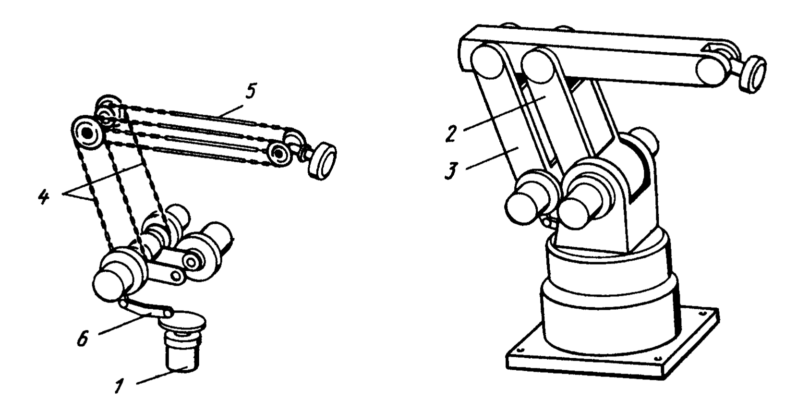


Рис. 5.13. Внешний вид «технологического робота» фирмы «Хитати» и системы его передач

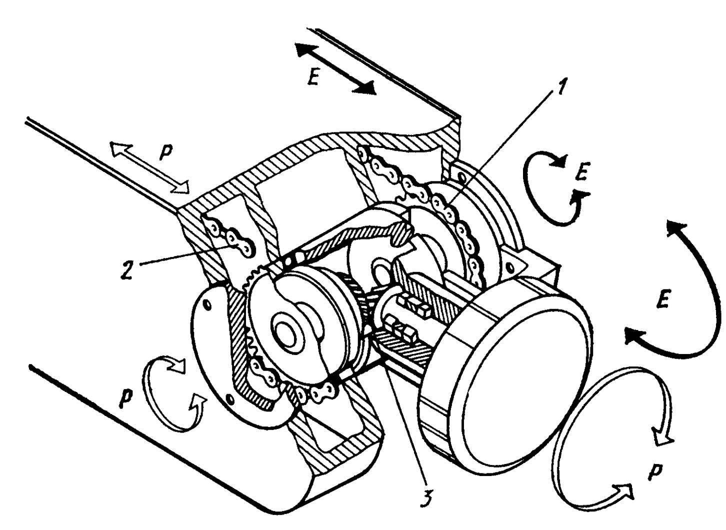


Рис. 5.14. Запястье с двумя степенями подвижности «технологического робота» фирмы «Хитати»

5.9. Уязвимые места конструкции

Традиционно роботы используются в процессах с жестко зафиксированными продолжительностями выполнения операции (например, для точечной сварки или сборки). Как правило, 80 % всех аварий роботов связаны с периферийными устройствами (включая устройство управления) [14]. Если надежность системы в целом должна составлять не менее 99,5 %, то механическая система должна проектироваться с плановой надежностью 99,9 %, поэтому необходимо рассмотреть все потенциально ненадежные узлы (см. табл. 5.7).

5.7. Возможные уязвимые места в механических конструкциях

Уязвимое место	Тип конструкции	Необходимые меры	Метод вычислений	Метод измерений
Деформация отдельных компонент или всей системы		Увеличение жесткости Снижение веса конструкции Уравновешивание	Метод конечных элементов	См. разд. 10.4.1
Динамическая деформация		Увеличение жесткости Снижение веса движущихся частей Распределение масс	Частотные и временные методы	См. разд. 10.4.5
Мертвый ход		Снижение величины мертвого хода передач Использование жестких передач	Опыт изготовителя компонент	См. разд. 10.4.1
Люфт подшипников		Использование предварительно напряженных подшипников	Конструкция манипулятора и опыт изготовителя	См. разд. 10.4.1
Трение		Люфт подшипников Подбор смазочного материала	Опыт изготовителя компонент	См. разд. 10.4.1,
Тепловые эффекты		Изоляция источников теплоты	Метод конечных элементов	См. разд. 10.4.1, 10.4.3
Датчики		В зависимости от расположения и связи с механической частью	Опыт изготовителя	—

Деформации всей конструкции и отдельных компонентов можно скомпенсировать за счет ввода в устройство управления корректирующих воздействий. Кроме того, разработчик может увеличить жесткость системы, уменьшить вес, сбалансировать звенья, оптимально разместить подшипники.

Управлять деформацией очень сложно. Были исследованы два метода [17]: введение линейного управления в цепи управления скоростью и введение механической системы управления в цепи позиционного управления.

Из конструкторских приемов можно порекомендовать увеличить жесткость, уменьшить массу перемещаемых частей и оптимизировать распределение масс. В процессе оценивания полезно воспользоваться экспериментальным методом анализа режимов (см. гл. 10).

Мертвый ход, люфт подшипников и трение относятся к нелинейным характеристикам, ухудшающим точность и стабильность работы сервомеханизма. Правильное проектирование механической схемы позволяет избежать многих затруднений (табл. 5.7).

Тепловая деформация обычно компенсируется устройством управления. В некоторых случаях возможно применение теплоизоляции.

Особое внимание следует обратить на систему внутренних датчиков, слабо связанных с механической системой.

Если рабочее пространство механической системы не совпадает с рабочим пространством, определенным устройством управления, то это может привести к серьезным авариям (см. разд. 10.4).

5.10. Примеры

Ниже описываются промышленные роботы для разных областей применения.

5.10.1. Модульное проектирование сборочного робота — модель FMS фирмы «Бош»

Роботы фирмы «Бош» представляют собой агрегатную гамму на базе совместимых модулей с пневматическими и электромеханическими приводами. Такая система позволяет компоновать оптимальную для конкретной области использования конфигурацию. Роботы агрегатного построения очень удобны для манипулирования объектами, подачи деталей и сборки. На рис. 5.15 изображена общая схема роботов «Бош». Следует отметить, что робот может оснащаться различными захватами.

Модуль горизонтального и вертикального скольжения (звенья *1* и *3* на рис. 5.15). На рис. 5.16 изображен модуль скольжения *2*, передвигающийся по предварительно напряженным шариковым подшипникам *3*, и его основание *1*. Передача энергии осуществляется реечной цилиндрической зубчатой передачей *4*. Электрические кабели и магистрали сжатого воздуха проложены параллельно направлению движения в защищенном кожухе *5*. Вертикальная скользящая каретка снабжена пневматическим компенсатором веса *6* и тормозами.

Модуль вращения манипулятора (звено *2* на рис. 5.15). Для построения робота с цилиндрической системой координат между двумя модулями скольжения устанавливается модуль вращения манипулятора.

Модуль поступательного движения (звено *4* на рис. 5.15). Электромеханический модуль поступательного движения (рис. 5.17) состоит из трех основных узлов: каретки *1*, направляющей *2* и пневмопро-

Схема робота	Компоненты	
	1. Пневматический модуль горизонтального скольжения	*Длина хода 240/400/800, 1200/1600/2000 (мм);*
	2. Модуль вращения манипулятора	*Диаметр 400/630 (мм);*
	3. Пневматический модуль горизонтального скольжения	*Длина хода 240/400/800, 1200/1600/2000 (мм);*
	4. Пневматический модуль поступательного движения	*Длина хода 160/240/400/560 (мм);*
	5. Пневматический модуль короткого хода	*Длина хода 35/50 (мм);*
	6. Пневматический модуль вращения захвата	

Рис. 5.15. Сборочный робот, построенный по модульному принципу (с разрешения фирмы «Бош»)

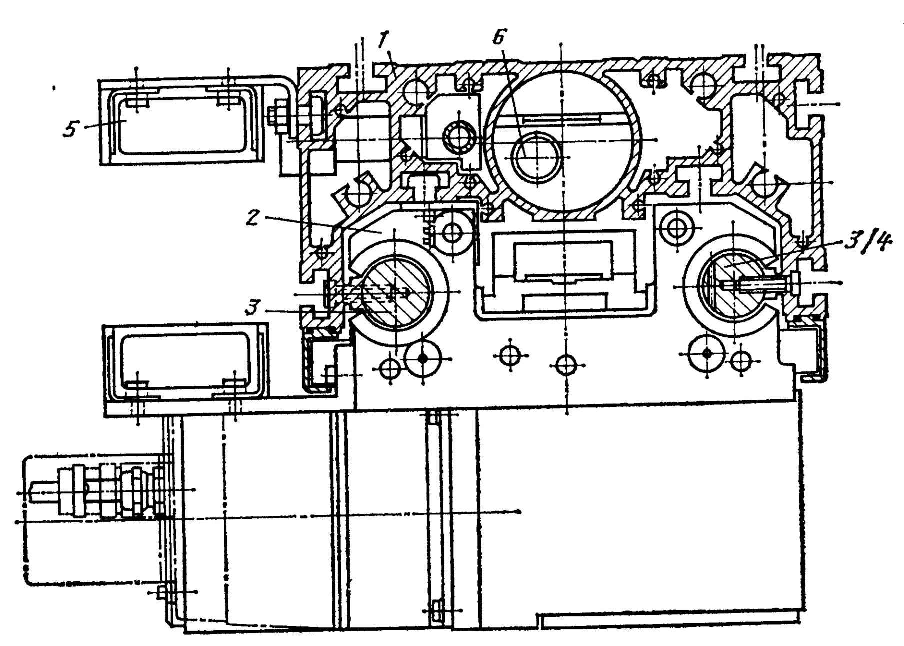


Рис. 5.16. Модуль горизонтального и вертикального скольжения (с разрешения фирмы «Бош»)

вода *3*. Приводы состоят из двигателя *4*, передачи *5* и внутреннего датчика *6*. Вращательное движение двигателя преобразуется в поступательное движение каретки с помощью реечной цилиндрической передачи *7*. Каретка перемещается по направляющей *8*.

Система энергоснабжения строится следующим образом: электроэнергия подается по спиральному кабелю *9*, а воздух — по специальным трубкам.

Пневматический модуль с укороченным ходом (звено *5* на рис. 5.15). При сборке

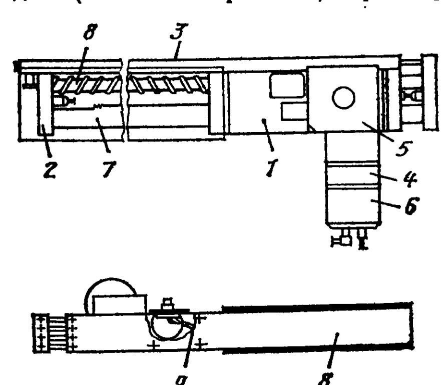


Рис. 5.17. Модуль поступательного движения (с разрешения фирмы «Бош»)

довольно часто требуется выполнять быстрые короткие вертикальные перемещения. Такие перемещения осуществляются кареткой (рис. 5.18), которая может устанавли-

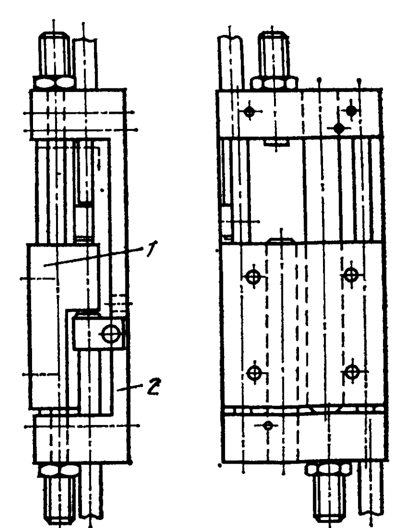


Рис. 5.18. Пневматический модуль с укороченным ходом (с разрешения фирмы «Бош»):

1 — фланцы соединения с захватом; *2* — фланцы соединения с модулем поступательного движения

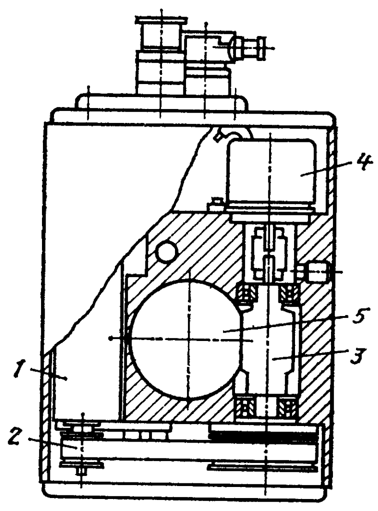


Рис. 5.19. Модуль вращения захвата (с разрешения фирмы «Бош»)

ваться как на модуле поступательного движения, так и на модуле вращения захвата.

Модуль вращения захвата (звено *6* на рис. 5.15). Модуль вращения захвата (рис. 5.19) используется для вращения захвата вокруг одной оси. Он состоит из корпуса и вращающейся платформы *5*. В корпусе установлены двигатель *1*, зубчатая ременная передача *3* и внутренний датчик *4*. Стандартные переходные устройства позволяют совместную работу с пневматическими звеньями.

Для промышленных роботов агрегатного построения характерно следующее:

а) в большинстве случаев в них используются только поступательные звенья;

б) с увеличением числа звеньев (свыше пяти) модульная система сильно усложняется;

в) возможна компоновка робота с учетом требований конкретного задания;

г) оптимальное взаимодействие с периферийным оборудованием возможно, если в систему будут включены модульные вспомогательные устройства;

д) размещение оборудования и компоновка модулей упрощается при использовании САПР/АСТПП;

е) агрегатные роботы лучше всего приспособлены для подачи деталей и сборки.

На рис. 5.20 изображен эскиз агрегатного робота «Бош» тельферного типа, полученный с помощью САПР. Используя

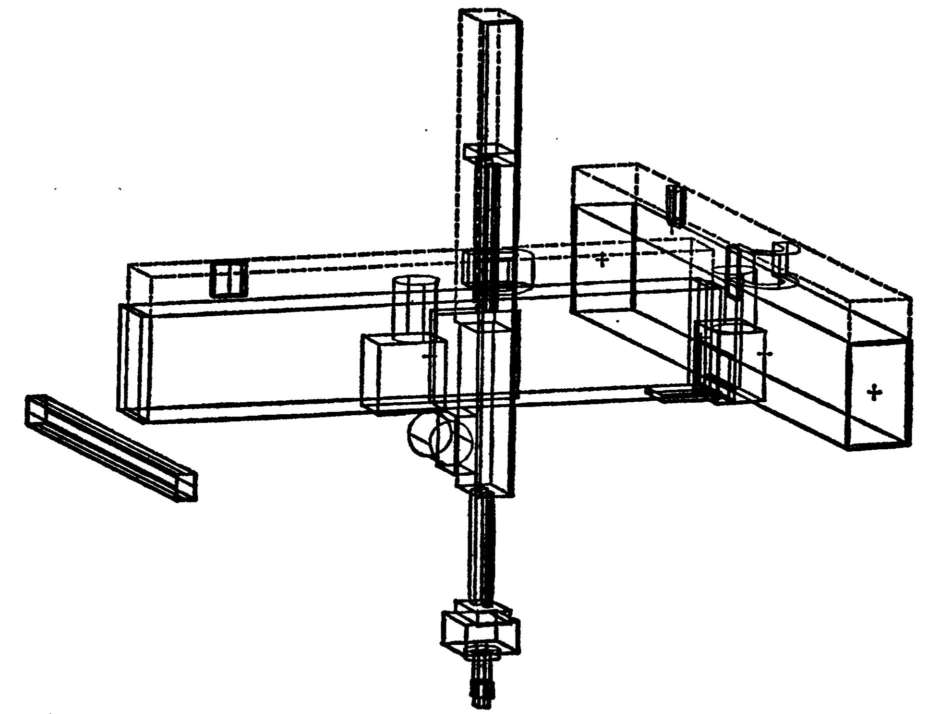


Рис. 5.20. Эскиз агрегатного робота фирмы «Бош» тельферного типа, полученный с помощью САПР (с разрешения фирмы «Бош»)

налогичный подход к проектированию, ирма «Бош» разработала модульную систему управления, компонуя модули которой, можно построить ряд устройств управления периферийного оборудования и роботов.

5.10.2. Ангулярный робот с горизонтальными осями вращения — РТ 300Н фирмы «Дайнити Кико»

Фирма «Дайнити Кико» разработала мму промышленных роботов со следуюими особенностями.

Механическая ангулярная конструкция анипулятора практически одинакова при оризонтальном и вертикальном направлеии осей вращения. На рис. 5.21 приведена хема манипулятора этого робота. В состав обоих вариантов робота входят венья *B*, *A* и *D* (вариант *V*, горизонтальое расположение осей); звенья *C*, *D* и *P* вариант *H*, вертикальное расположение сей). Вариант *V* снабжен дополнительным веном *C* и вторым звеном запястья *E*; в ариант *H* включено поступательное звено укороченным ходом.

Предельные нагрузки, длина плеча маниулятора и число программно управляемых тепеней подвижности для различных моделей робота приведены в табл. 5.8.

Управление всеми роботами осуществляется различными модификацями одного устройства управления (табл. 5.9). Ниже устройство управления робота *РТ300Н* описано более подробно.

5.8. Предельные нагрузки, длина плеча манипулятора и число программно управляемых осей для различных моделей робота

Модель	Предельная нагрузка, кг	Длина плеча манипулятора *C* и *D* (вариант *H*), *B* и *A* (вариант *V*), мм	Число программно управляемых осей
PT200	2	450	*H*:3—4/*V*:5
PT300	5	700	*H*:3—4/*V*:5
PT800	25	1500	*V*:5

5.9. Модификации устройства управления

Модификация	Позиционное управление	Число осей	Число одновременно управляемых осей
R510	*PTP*	5	1
A200	*PTP*	6	3 + 3
A250	*PTP* + *CP*	6	3 + 3
A300	*CP*	6	6

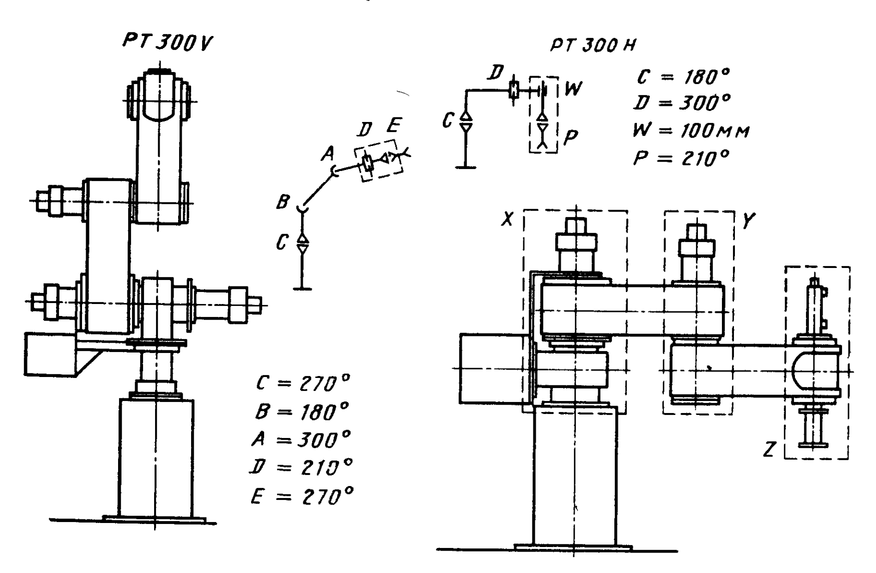


Рис. 5.21. Семейство агрегатных промышленных роботов *PT300* (с разрешения фирмы «Дайнити Кико»)

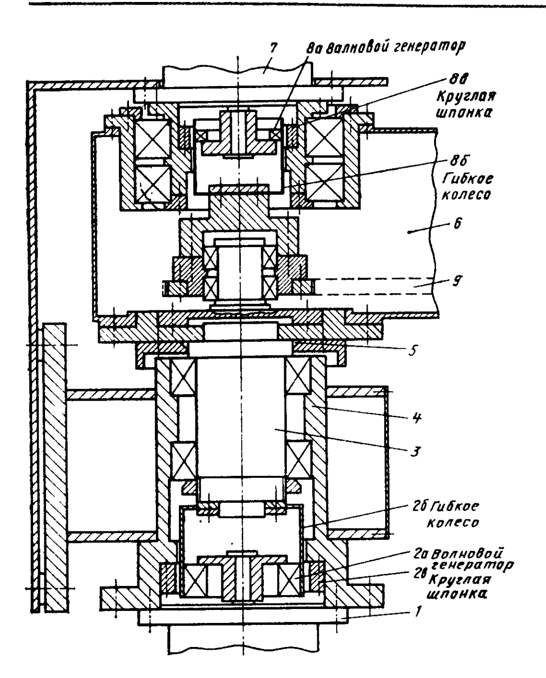


Рис. 5.22. Установка и система приводов звеньев *C* и *P* робота *PT300H* фирмы «Дайнити Кико» (с разрешения фирмы «Дайнити Кико»)

Основание, звено *C*, приводы звеньев *C* и *P*. Фрагмент *X* (см. рис. 5.21) представлен на рис. 5.22 в увеличенном виде. Звено *C* манипулятора приводится в движение электродвигателем постоянного тока с встроенным инкрементным датчиком положения *1*. Двигатель закреплен на основании *4*. Снижение скорости обеспечивается волновым редуктором *2* с гибким колесом *2б*, установленным на валу двигателя. Вал двигателя *3* и звено *C*(*6*) соединены установочным конусом *5* и болтами по фланцу. Привод запястья *P*(*7*) (ориентация) установлен соосно приводу звена *C* и закреплен на основании *8*. Привод запястья *P*(*7*) состоит из серводвигателя постоянного тока *7* со встроенным инкрементным датчиком и волновой передачей *8*, соединенной с зубчатой ременной передачей *9*.

Передача звена *P*, сочленение звеньев *C* и *D* и привода звена *D*. На рис. 5.23 укрупненно изображен фрагмент *Y* (см. рис. 5.21). Движение зубчатого ремня *9*, идущего от звена *C* (*6*), передается на зубчатую ременную передачу *10* звена *D* (*16*) через установленный в подшипниках полый вал *11*. Звено *D* (*16*) приводится в движение двигателем постоянного тока *12*, волновой передачей *13* и ведущим валом *14*. Звено закреплено на оси втулкой *15*.

Звенья запястья *W* и *P*. На рис. 5.24 в увеличенном виде представлен фрагмент *Z* из рис. 5.21. Вертикальное звено *W* может быть выполнено в следующих вариантах:

а) с программно управляемым приводом от двигателя постоянного тока *17* и шпинделем *19*, обеспечивающим поступательное движение;

б) с механически управляемым пневматическим приводом. В этом случае поступательное движение осуществляет цилиндр *22*.

В обоих вариантах используется одно и то же звено *P*. Его перемещение осуществляется зубчатой ременной передачей *10*, как у вертикального вращательного звена *W* (*18*). Звено *P* построено в виде параллелограмма, так же как у описанного выше робота фирмы «Хитати». К присоединительному фланцу *21* могут прикрепляться как электрические, так и пневматические захваты и рабочие органы.

Схема робота *PT300H* восходит к гамме роботов СКАРА. Она включает в себя два звена, обеспечивающих перемещения по плоскости, короткое вертикальное звено *W*

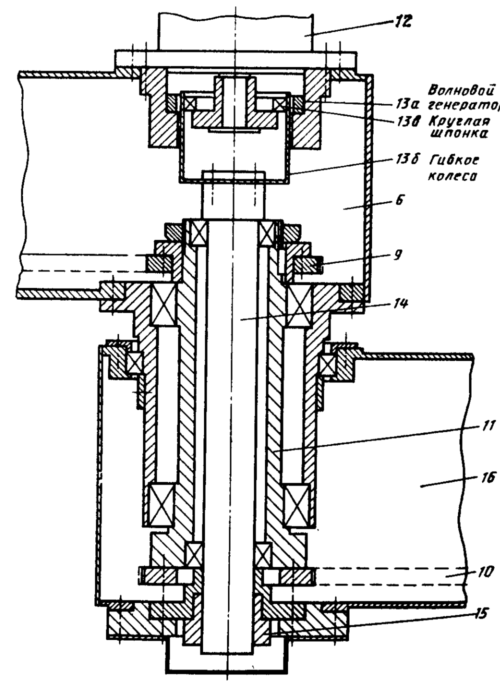
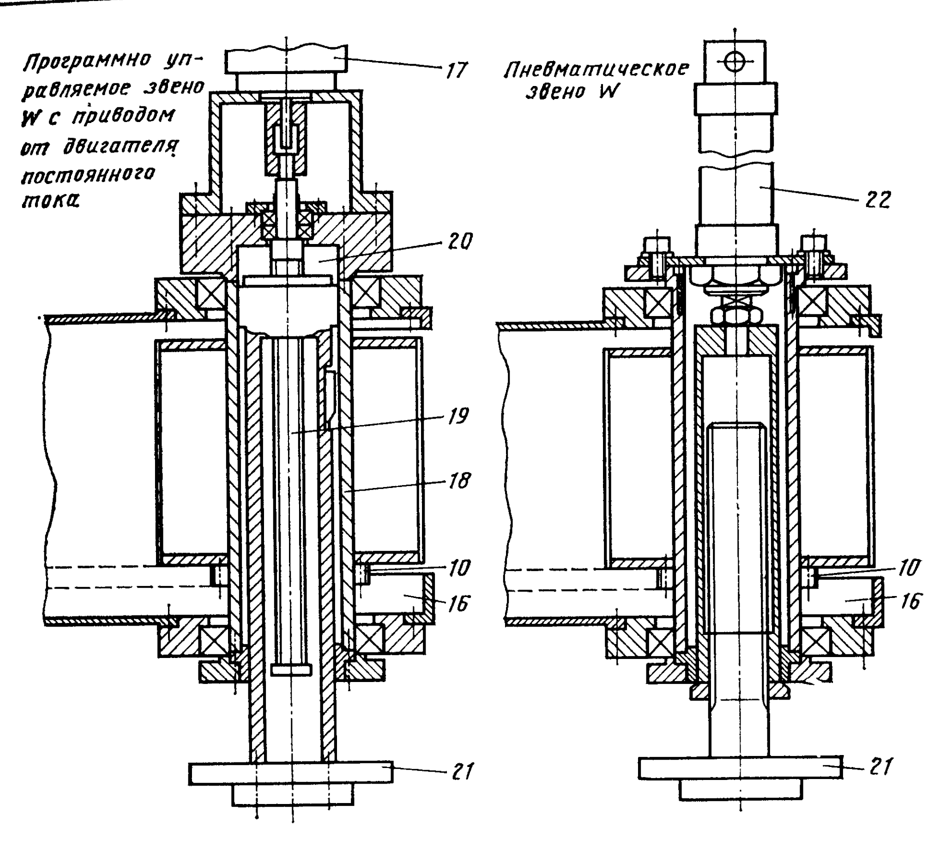


Рис. 5.23. Сочленение звеньев *C* и *D* и привода звена *D* робота *PT300H* фирмы «Дайнити Кико» (с разрешения фирмы «Дайнити Кико»)



ис. 5.24. Электромеханическое и пневматическое звено запястья *W* робота *PT300H* фирмы Дайнити Кико» (с разрешения фирмы «Дайнити Кико»)

звено *P*, обеспечивающее разворот рабо-го органа. Построенные по этой схеме оботы для обслуживания станков заслу-или хорошую репутацию и пользуются оммерческим успехом.

На основании изложенного выше можно елать некоторые выводы.

Все роботы гаммы рассчитаны на выпол-ние определенных заданий. Гаммой робо-в, имеющих различную грузоподъемность, сло звеньев, тип системы управления и т. д., могут быть удовлетворены требова-ния различных заданий.

В конкретных моделях роботов гаммы нет избыточного оборудования, не исполь-зуемого для выполнения задания.

Возможна замена отдельных узлов ро-бота.

Затраты на развитие системы управле-ния и языков программирования распре-деляются по всем моделям гаммы робо-тов.

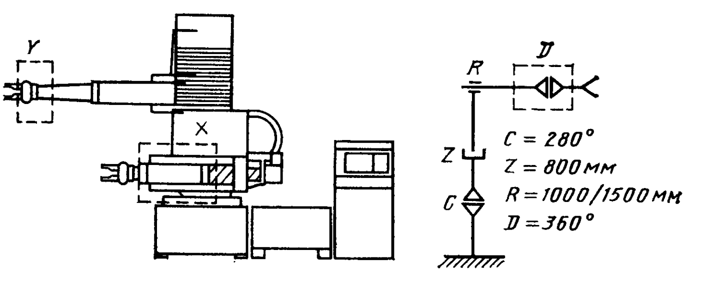


Рис. 5.25. Гидравлический робот *ZFTIIIL* с цилиндрической системой координат (с разрешения фирмы «Занрадфабрик Фридрихсхафен»)

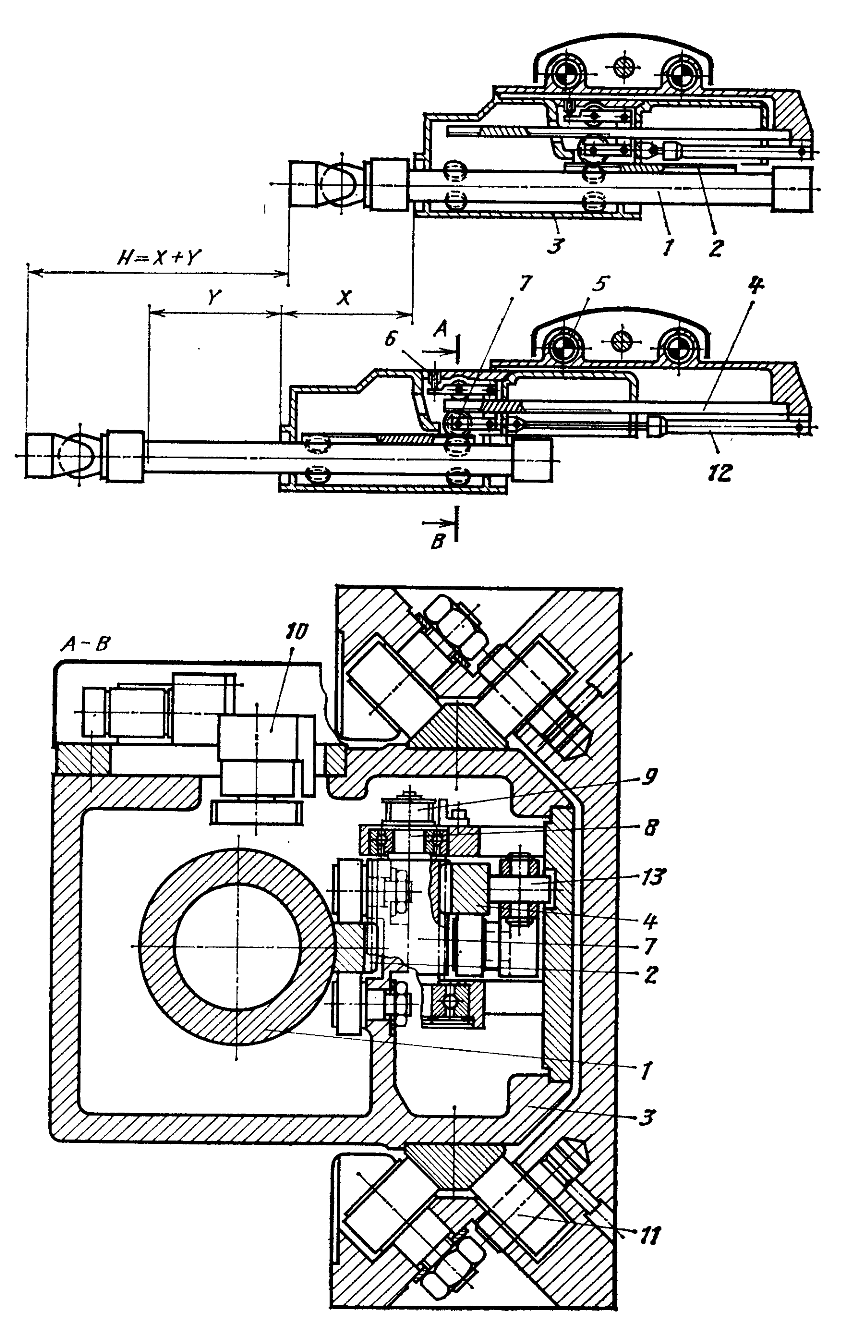


Рис. 5.26. Поступательное звено *R*: принцип передачи движения, конструкция подшипников и установка датчика положения звена (с разрешения фирмы «Занрадфабрик Фридрихсхафен»)

Некоторые модели гаммы могут выпускаться очень малыми сериями, что сопряжено с коммерческим риском.

5.10.3. Гидравлический робот с цилиндрической системой координат ZFTIIIL

Модель робота для переноски деталей *ZFTIIIL* была разработана фирмой «Занрадфабрик Фридрихсхафен». На рис. 5.25 приведена его общая схема. Ее основу составляют четыре сервоуправляемых гидравлических звена: *C, Z, R* (манипулятор) и *D* (запястье). Возможны следующие модификации: установка другого звена *P* запястья, введение звена поступательного движения *Y*, различные варианты захватов, устройство управления, обслуживающее от четырех до шести звеньев.

После тщательного изучения особенностей операции переноски тяжелых деталей были выработаны следующие общие концепции проектирования.

Из соображений компактности манипулятора звено *R* должно быть телескопическим.

Для переноски малых деталей предусмотрена возможность использования длинного и тонкого звена *P*.

Должны использоваться средства защиты от перегрева и загрязнений.

Выбор гидравлической системы привода продиктован необходимостью переноса тяжелых деталей с большой скоростью.

Звено *R*. Принцип передачи движения и конструкция подшипников показаны на рис. 5.26 (увеличенный фрагмент *X* на рис. 5.25). Штанга состоит из части *X*, скрытой в корпусе *3*, и части *Y* — внешней трубы *1*. Труба *1* приводнтся в движение с помощью сдвоенной шестерни *7*. Одна ее часть входит в зацепление с зубчатой рейкой *4*, расположенной в корпусе, а вторая — с зубчатой рейкой, соединенной с трубой. Регулировка зазора в этом зацеплении осуществляется винтом *6*, зубчатая рейка прикрепляется к шестерне роликом *13*. Вращение сдвоенной шестерни осуществляется сервоцилиндром *12* и зубчатой рейкой *4*; одновременно осуществляется измерение параметров положения звена с помощью ременной передачи *9* и датчика положения звена *10*.

Скольжение подвижных частей обеспечивают регулируемые роликовые подшипники *11*. Изменяя количество зубьев шестерни *8*, можно управлять диапазоном перемещения звена.

Звенья запястья *D*, *P* и двойной захват. В случае запястья с гидравлическим приводом шесть основных магистралей обеспечивают движение звеньев *D* и *P* и питание цилиндра, управляющего захватом. Измерение параметров положения осуществляется с помощью датчиков. Открытие и закрытие двойного захвата производится с помощью цилиндрического золотникового гидроаппарата.

Рассмотренный пример показывает, как требования технологии определяют особенности конструкции. Роботы *ZFTIIIL* имеют хорошую репутацию, так как их можно применять на сложных операциях закаливания в ваннах, обслуживания кузнечных прессов и фрезерных станков. Следует отметить, что конструкция роботов дорабатывалась по замечаниям потенциальных пользователей.

5.10.4. Универсальный робот с шестью степенями подвижности — модель IR100 фирмы КУКА

Основной принцип построения универсальных роботов — возможность выполнения ими различных заданий при малых дополнительных затратах. В качестве примера можно привести робот модели *IR100/160* производства фирмы КУКА, предназначенный для выполнения точечной и дуговой сварки, сборки тяжелых деталей, механической обработки (совместно с другими роботами).

На рис. 5.27 изображен робот *IR100/160*, имеющий шесть программно управляемых степеней подвижности. При его проектировании были заданы следующие основные характеристики: высокая подвижность, возможность установки в различных вариантах (например, на несущей мостовой конструкции); повышенная жесткость звеньев и отсутствие люфта подшипников (и, как следствие, высокая точность повторного позиционирования); малый дрейф рабочих характеристик и простота обслуживания.

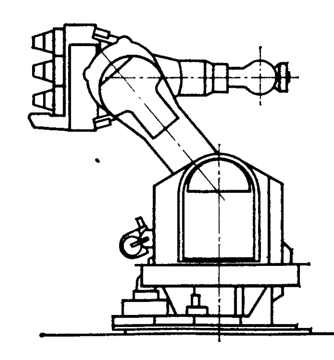


Рис. 5.27. Универсальный робот *IR100/160* фирмы КУКА (с разрешения фирмы КУКА)

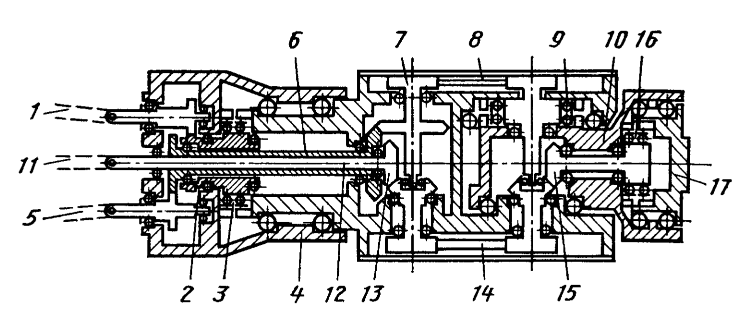


Рис. 5.28. Запястье с тремя степенями подвижности (с разрешения фирмы КУКА)

Были использованы следующие конструкторские приемы: установка всех осей звеньев в предварительно напряженных роликовых подшипниках; замкнутая гидравлическая балансировка второго звена; размещение всех двигателей привода запястья на краю третьего звена в качестве противовеса. Двигатели и запястье соединены карданными передачами.

Степени подвижности запястья *D*, *E*, *P*. Основные конструктивные особенности запястья (рис. 5.28): компактное построение, все три оси сходятся в одной точке; благодаря малым размерам малые величины моментов инерции; встроенная в запястье волновая передача.

Привод запястья осуществляется с помощью следующих приспособлений.

Степень подвижности *D*: карданная передача *1* на полый вал *6*, гибкое колесо *3* на оси *D(4)*.

Степень подвижности *E*: карданная передача *5* на полый вал *6*, шестерня *7*, зубчатый ременный привод *8*, гибкое колесо *9* на оси *E(10)*.

Степень подвижности *P*: карданная передача *11* на валу *12*, шестерня *13*, зубчатый ременный привод *14*, шестерня *15*, гибкое колесо на оси *P(17)*.

По рассмотренному примеру можно сделать следующие выводы.

Если цена многофункционального робота модели *IR100* не будет слишком велика, то его можно будет выпускать очень крупными сериями.

Фирма КУКА, как и многие другие изготовители роботов, завоевала рынок, опираясь на специальную технологию: вначале робот поставлялся как часть производственной системы (сварочной).

При использовании в разных цехах одной фирмы многофункциональный робот очень удобен с точки зрения обслуживания и программирования. Это также справедливо для агрегатных систем и гамм роботов.

Основной недостаток многофункциональных систем — их относительная дороговизна, так как во многих случаях некоторые их функции не используются.

5.11. Заключение

Можно сделать следующие выводы, касающиеся конструирования механической части промышленных роботов:

требования, предъявляемые к промышленным роботам, во многом определяются особенностями их использования. Выбор конструкции (универсальный робот, модульный робот или специализированный робот) делается на основе прогноза объема выпуска данного робота;

для разработки удачной роботизированной системы необходим тщательный анализ всех аспектов ее практического использования. Следует оценить степень технологической гибкости возможных вариантов конструкции робота, захватов, инструментов и периферийного оборудования и объединить все компоненты в систему. В большинстве случаев «узким местом» технологнчески гибкой автоматизации являются вспомогательные устройства;

разработка совершенной системы возможна только на основе комплексного подхода к выбору механической структуры, системы управления, языка программирования и вспомогательных устройств.

Определение рабочих характеристик роботов должно осуществляться по международной системе стандартов, классификаций и тестов.

В будущем следует ждать развития принципов механического конструирования в следующих направлениях:

упрощение механической части;

разработка новых типов приводов и встроенных датчиков положения;

сокращение сроков исследований и разработок. Использование САПР/АСТПП в проектировании, выпуске чертежей, технологической подготовке, техническом контроле и производстве;

внедрение новых методов преобразования координат, управления роботом и расчета траектории;
совершенствование подвижных роботов.

Скорее всего, ускоренными темпами будет идти внедрение промышленных роботов в новых предметных областях.

Благодарности. Авторы благодарят Декселя и Кауфмана (фирма «Бош»), Зиммера и Ворна (фирма КУКА), Кристена (фирма «Стифельмейер»), Сотера и Маннога (фирма «Занрадфабрик Фридрихсхафен»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. VDI 2861, Blatt 1 und 2, Entwurf, Bezeichnungen und Kenngrößen von Handhabungseinrichtungen, *VDI-Verlag*.
2. Warnecke, H. J., and Schraft, R. D., *Industrial Robots*, IFS Publications Ltd., Bedford, 1982.
3. Spur, G., *Industrieroboter*, Hanser-Verlag, Munich, 1979.
4. Schraft, R. D., and Schiele, G., Industrieroboter zum Lackieren, *I-Lack*, February 1982, pp. 65—73.
5. Wanner, M. C., and Weiss, K., Systematische Vorgehensweise bei der Konzeption, der Entwicklung und Ausarbeitung von Handhabungseinrichtungen, *Technische Rundschau*, February 1982, pp. 16—17.
6. Herrmann, G., *Analyse von Handhabungsvorgängen im Hinblick auf deren Anforderungen an programmierbare Handhabungsgeräte in der Teilefertigung*, Dr.-Ing. dissertation, University of Stuttgart, 1976.
7. Jou, T. M., and Waldron, K. J., Geometric design of manipulators using interactive computer graphics, *6th IFToMM Congress on Theory of Machines and Mechanisms*, New Delhi, 1983.
8. Schmieder, L., Kinematik und Betriebsprogramme von rechnergesteuerten Manipulatoren, *Lehrgang R1.08*, March 1979, DFVLR Oberpfaffenhofen.
9. Horn, K. P., Kinematics, statics and dynamics of Two-D manipulators, *MIT Working paper* 99, June 1975.
10. Horn, K. P., Hirokawa, K., and Vizirani, V., Dynamics of a three degree of freedom kinematic chain, *MIT A. I. Memo 478*, October 1977.
11. Takano, M., Yashima, K., and Yada, S., Development of computer simulation system of kinematics and dynamics of robots, *Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo (B)*, no. 4, 1982.
12. Duelen, G., and Wendt, W., Ein Regelungsverfahren zur Verminderung von Bahnabweichungen bei Handhabungsgeräten, *ZwF*, October 1982, pp. 441—445.
13. Hopfengärtner, H., Lageregelung schwingungsfähiger Servosysteme am Beispiel eines Industrieroboters, *Regelungstechnik*, January 1981, pp. 3—10.
14. Zimmer, E., Industrieroboter — mechanische Konstruktion, *Konstruktion*, June 1983, pp. 221—227.
15. *Handbook of Small Standardized Components*, Master catalog 757, Stock Drive Products, New York, 1982.
16. Hashimoto, T., Power transmission equipments of the industrial robot, *Robot*, October 1981, pp. 75—82.
17. Futami, S., Kyura, N., and Nanai, S., Intelligent servo system: an approach to control-configured robot, *12th ISIR*, Paris, June 1982, pp. 381—390.
18. Manogg, H., Industrieroboter, konzipiert für die Handhabung von Werkstücken, *Konstruktion*, June 1983, pp. 239—245.

Список дополнительной литературы

Blume, C., and Dillmann, R., *Freiprogrammierbare Manipulatoren*, Vogel-Verlag, Würzburg, 1981.
Blume, C., and Jakob, W., *Programmiersprachen für Industrieroboter*, Vogel-Verlag, Würzburg, 1983.
Engel, G., *Konzipierung und Auslegung modular aufgebauter Handhabungssysteme*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1980.
ISO/TC 97/SC 8, *US Contribution for Discussion of Robots: Glossary of Terms for Robotics*, National Bureau of Standards, Washington, DC, 1981.
Makino, H., A kinematical classification of robot manipulators, 6th International Symposium on Industrial Robots, *IFS Publications Ltd.*, Bedford, 1976.

Paul, R. P., *Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control*, MIT Press, Cambridge, 1982.
Schraft, R. D., *Systematisches Auswählen und Konzipieren von programmierbaren Handhabungsgeräten*, Dr.-Ing. dissertation, University of Stuttgart, 1977.
Steusloff, H., *Methods for Very Advanced Industrial Robots*, Springer-Verlag, 1980.
Volmer, J., *Industrieroboter*, VEB-Technik Verlag, Berlin, 1981.

Глава 6

КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА

М. В. Уокер, Клемсонский университет, г. Клемсон, шт. Южная Каролина

6.1. Введение

Цель этой главы — описание методики анализа кинематики и динамики манипуляторов. Глава состоит из четырех разделов: «Введение», «Кинематика», «Динамика» и «Заключение».

В разделе «Кинематика» для описания положения манипулятора используются две системы координат: связанная со звеньями система координат и система координат, связанная с сочленениями. Кинематика манипулятора рассматривается с точки зрения преобразования из системы координат, связанной с сочленениями, в систему координат, связанную со звеньями, и обратного преобразования из системы координат, связанной со звеньями, в систему координат, связанную с сочленениями. Обсуждаются вопросы, связанные с неоднозначностью этих преобразований. Кроме преобразований координат, рассматриваются вопросы преобразования скоростей и ускорений из системы координат, связанной со звеньями, в систему координат, связанную с сочленениями, и наоборот.

В разделе «Динамика» приводятся уравнения движения манипулятора. Описываются принципы построения модели манипулятора как разомкнутой системы, в виде уравнений для координат, скоростей и ускорений в системе координат звеньев и их использование совместно с уравнениями Ньютона — Эйлера для движения свободного тела. Динамика манипулятора как замкнутой кинематической системы более сложна, поэтому в главе приводятся ссылки на другие источники.

В «Заключении» делаются выводы и описываются пути совершенствования приведенных в главе вычислительных процедур. Пакет таких процедур может оказать существенную помощь при моделировании и разработке системы управления манипулятором. Описания этих процедур приводятся в статье не только для того, чтобы читатель мог получить информацию, но и чтобы подчеркнуть взаимосвязь описанных концепций.

Обозначения:

m — число степеней подвижности манипулятора;

$\mathbf{q}$ — $(m \times 1)$-мерный вектор значений координат сочленений;

$\dot{\mathbf{q}}$ — $(m \times 1)$-мерный вектор значений скорости сочленений;

$\ddot{\mathbf{q}}$ — $(m \times 1)$-мерный вектор значений ускорений сочленений;

$\mathbf{A}(j, i)$ — матрица размером 4×4 однородного преобразования при переходе из системы координат, связанной со звеном i, в систему координат, связанную со звеном j;

$$\mathbf{A}_i(\mathbf{q}) = \mathbf{A}(0, i) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_i & \mathbf{y}_i & \mathbf{z}_i & \mathbf{p}_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

вычисленное при значении координаты сочленения, равной $\mathbf{q}$;

$\mathbf{J}(\mathbf{q})$ — матрица Якоби размером 6×6;

$\mathbf{w}_i$ — (3×1)-мерный вектор угловых скоростей в системе координат звена i;

$\dot{\mathbf{w}}_i$ — (3×1)-мерный вектор угловых ускорений в системе координат звена i;

$\mathbf{v}_i$ — (3×1)-мерный вектор линейных скоростей в системе координат звена i;

$\dot{\mathbf{v}}_i$ — (3×1)-мерный вектор линейных ускорений в системе координат звена i;

$\hat{\dot{\mathbf{v}}}_i$ — (3×1)-мерный вектор линейных ускорений центра масс звена i;

$\mathbf{f}_i$ — (3×1)-мерный вектор сил, приложенных к звену i со стороны звена $i-1$;

$\mathbf{n}_i$ — (3×1)-мерный вектор моментов, приложенных к звену i со стороны звена $i-1$;

$\mathbf{F}_i$ — (3×1)-мерный вектор суммы сил, приложенных к звену i;

$\mathbf{N}_i$ — (3×1)-мерный вектор суммы моментов, приложенных к звену i;

$\mathbf{H}(\mathbf{q})$ — симметричная неединичная матрица обобщенных моментов инерции размером $m \times m$;

$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ — $(m \times 1)$-мерный вектор, задающий влияние центробежных и кориолисовых сил в динамической модели манипулятора. Отметим, что $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \mathbf{0}) = 0$;

$\mathbf{q}(\mathbf{q})$ — $(m \times 1)$-мерный вектор, задающий влияние сил тяжести, включаемый в динамическую модель манипулятора;

$\mathbf{k}$ — (6×1)-мерный вектор внешних сил и моментов, приложенных к звену m в системе координат, связанной с этим звеном. Первые три координаты образуют (3×1)-мерный вектор моментов, а остальные три — (3×1)-мерный вектор сил;

$\mathbf{u}$ — $(m \times 1)$-мерный вектор моментов (сил) приводов всех звеньев;

$mass_i$ — масса i-го звена;

r_i — положение центра масс звена i относительно начала координат звена i, выраженное в системе координат основания;

I_i — матрица размером 3×3 моментов инерции звена относительно центра масс звена i, выраженная в системе координат основания;

$\hat{r}_i$ — положение центра масс звена i относительно начала координат звена i, выраженное в системе координат звена i;

$\hat{I}_i$ — матрица размером 3×3 моментов инерции звена i относительно центра масс звена i, выраженная в системе координат звена i.

6.2. Кинематика

Манипулятор предназначен для перемещения рабочего органа (который иногда называют кистью, захватом или инструментом). Эта часть манипулятора физически взаимодействует с окружающей средой. Для выполнения задания робот должен располагать информацией о положении детали и о том, какое положение относительно этой детали должен занять рабочий орган. Эти данные определяются по кинематической модели манипулятора. В этом разделе описывается такая модель и показывается, как с ее помощью определяются значения координат, скоростей и ускорений каждого из звеньев и, следовательно, рабочего органа.

6.2.1. Однородное преобразование

На рис. 6.1 представлены три системы координат. Известны параметры положения и ориентации системы координат c относительно системы координат b, а также параметры положения и ориентации системы координат b относительно системы координат a. Требуется определить параметры положения системы координат c относительно системы координат a.

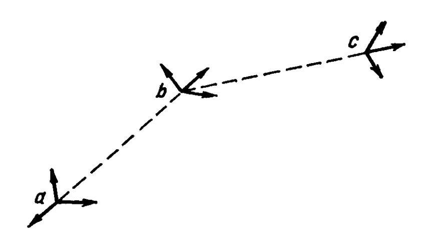


Рис. 6.1. Три последовательные системы координат

Ориентацию можно задать несколькими способами [20]. Мы будем пользоваться матрицей направляющих косинусов. Эта матрица размером 3×3, столбцами которой являются трехмерные векторы, задающие направления осей x, y и z правосторонней прямоугольной системы координат.

Обычно для преобразования параметров ориентации и положения из одной системы координат в другую используется однородное преобразование. Однородное преобразование задается матрицей размером 4×4 вида:

$$\mathbf{A}(a, b) = \begin{bmatrix} \mathbf{x} & \mathbf{y} & \mathbf{z} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D} & & & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{A}(a, b)$ — преобразование из системы координат b в систему координат a; $\mathbf{D}$ — матрица размером 3×3 косинусов углов поворота системы координат b относительно системы координат a; $\mathbf{p}$ — (3×1)-мерный вектор, определяющий начало системы координат b в системе координат a. Преобразование из системы координат c в b обозначается $\mathbf{A}(b, c)$. Зная $\mathbf{A}(a, b)$ и $\mathbf{A}(b, c)$, можно вычислить $\mathbf{A}(a, c)$, перемножив эти матрицы преобразования:

$$\mathbf{A}(a, c) = \mathbf{A}(a, b)\mathbf{A}(b, c).$$

Пользуясь такими обозначениями, удается упростить формулы и построить простой алгоритм вычисления положения и ориентации произвольной системы координат относительно любой другой системы координат. Умножение двух матриц однородного преобразования $\mathbf{B}$ и $\mathbf{C}$ с записью результата в $\mathbf{A}$ производится процедурой *MULMAT* (выходной параметр $\mathbf{A}$, входные параметры $\mathbf{B}$ и $\mathbf{C}$):

$$\mathbf{A} = \mathbf{BC}.$$

Можно легко вычислить и обратное преобразование:

$$\mathbf{A}(a, b)^{-1} = \mathbf{A}(b, a) = \begin{bmatrix} \mathbf{D}' & & & -\mathbf{D}'\mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где $'$ — обозначает операцию транспонирования.

Любое однородное преобразование может быть представлено в виде совокупности шести элементарных преобразований. Это оказывается возможным потому, что в матрицы направляющих косинусов входят только три независимых элемента, и то же самое справедливо для параметров положения. Выделяют следующие элементарные преобразования.

Поворот вокруг оси x на угол β:

$$Rot(x, \beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c(\beta) & -s(\beta) & 0 \\ 0 & s(\beta) & c(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Поворот вокруг оси y на угол β:

$$Rot(y, \beta) = \begin{bmatrix} c(\beta) & 0 & s(\beta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s(\beta) & 0 & c(\beta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Поворот вокруг оси z на угол β:

$$Rot(z, \beta) = \begin{bmatrix} c(\beta) & -s(\beta) & 0 & 0 \\ s(\beta) & c(\beta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Перенос вдоль оси x на расстояние δ:

$$Trans(x, \delta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Перенос вдоль оси y на расстояние δ:

$$Trans(y, \delta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \delta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Перенос вдоль оси z на расстояние δ:

$$Trans(z, \delta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \delta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

6.2.2. Прямая кинематическая задача

Прямая кинематическая задача состоит в определении положения и параметров движения звеньев по управляющим переменным сочленений. В следующем разделе описывается методика определения положения, скорости и ускорения каждого из звеньев манипулятора по заданным значениям скорости и ускорения изменения управляющих переменных сочленений.

6.2.3. Положение и ориентация в системе координат звена

Координата сочленения определяется значением его управляющей переменной. Если сочленение вращательное, то значение его координаты измеряется в радианах, а если поступательное — то в единицах длины. С каждым звеном манипулятора связывается правосторонняя система координат, состоящая из трех ортогональных единичных векторов. Эти связанные системы координат называются координатами звеньев, а их положение и ориентация задаются с помощью матриц однородного преобразования.

Хартенберг и Денави [1] предложили удобный способ задания координат звеньев. Положение связанных систем координат последовательно расположенных звеньев манипулятора описывается с помощью четырех параметров (рис. 6.2). Они обозначаются a, α, d и θ и определяются следующим образом:

a_i — кратчайшее расстояние между z_i и z_{i-1};

α_i — угол между z_i и z_{i-1};

d_i — кратчайшее расстояние между x_i и x_{i-1};

θ_i — угол между x_i и x_{i-1}.

Из этих параметров только один является переменным (в дальнейшем он обозна-

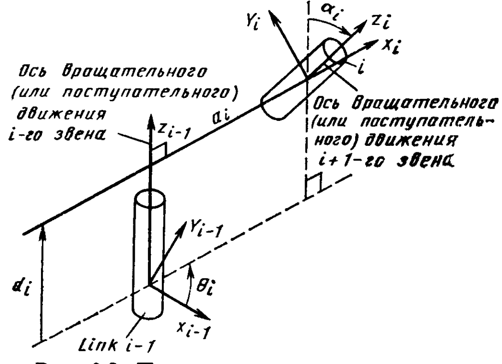


Рис. 6.2. Параметры в системах координат, связанных с двумя смежными звеньями

аается через q_i). Если i-е сочленение вра-щательное, то таким параметром будет θ_i, а d_i, a_i и α_i являются константами. Если -е сочленение поступательное, то таким па-раметром будет d_i, а a_i, α_i и θ_i — кон-станты.

Определение кинематических параметров манипулятора удобно проводить с по-мощью следующего алгоритма.

Алгоритм 1. Определение кинематических параметров

Шаг 1. Нарисуйте эскиз манипулятора.

Шаг 2. Пронумеруйте все звенья манипу-лятора от 0 до m, начиная от основания звено 0) до последнего звена (звено m).

Шаг 3. Пронумеруйте сочленения, при-ваивая сочленению i-го и $(i-1)$-го веньев номер i.

Шаг 4. Изобразите на рисунке единичные екторы $\mathbf{z}_{i-1}$ для всех i от 1 до m, при-ем $\mathbf{z}_{i-1}$ совпадает с осью вращения i-го вена, если оно вращательное, и с направ-ением смещения i-го звена, если оно по-тупательное.

Шаг 5. Определите a_i для всех i от 1 до m как минимальное расстояние между $\mathbf{z}_{i-1}$ $\mathbf{z}_i$.

Шаг 6. Изобразите на рисунке единичные екторы $\mathbf{x}_i$ в направлении от $\mathbf{z}_{i-1}$ к $\mathbf{z}_i$ так, тобы $\mathbf{x}_i$ были перпендикулярны к обоим екторам $\mathbf{z}_{i-1}$ и $\mathbf{z}_i$.

Шаг 7. Определите d_i для всех i от 1 до m как минимальное расстояние между $\mathbf{x}_{i-1}$ $\mathbf{x}_i$.

Шаг 8. Определите θ_i для всех i от 1 о m как угол поворота (положительный, сли отсчет идет против часовой стрелки) округ оси $\mathbf{z}_{i-1}$ вектора $\mathbf{x}_i$ относительно $\mathbf{x}_{i-1}$.

Шаг 9. Определите α_i для всех i от 1 о m как угол поворота (положительный, сли отсчет идет против часовой стрелки) округ оси x_i вектора z_{i-1} относительно z_{i-1}.

Поскольку системы координат для $(m+1)$-го звена не существует, значения па-раметров d_m, α_m и a_m могут быть прирав-ены к нулю, если звено m вращательное. Если звено 1 вращательное, то можно за-ать $d_0 = 0$.

Тогда положение и ориентацию системы оординат i-го звена относительно системы оординат $(i-1)$-го звена, $\mathbf{A}(i-1, i)$, мо-кно выразить следующим образом:

$$\mathbf{A}(i-1,\ i) = Trans\,(z,\ d_i)\ Rot\,(z,\ \theta_i)\ Trans\,(x,\ a_i)\ Rot\,(x,\ \alpha_i) =$$

$$= \begin{bmatrix} c(\theta_i) & -s(\theta_i)\,c(\alpha_i) & s(\theta_i)\,s(\alpha_i) & c(\theta_i)\,a_i \\ s(\theta_i) & c(\theta_i)\,c(\alpha_i) & -c(\theta_i)\,s(\alpha_i) & s(\theta_i)\,a_i \\ 0 & s(\alpha_i) & c(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \qquad (6.1)$$

Для выполнения преобразования $\mathbf{A}(i-1, i)$ и записи результата в массив $\mathbf{E}$ исполь-зуется процедура *HOMOJ* (выходной пара-метр — $\mathbf{E}$, входной параметр — i).

Чтобы определить положение и ориента-цию системы координат i-го звена относи-тельно системы координат $(i-2)$-го зве-на — $\mathbf{A}(i-2, i)$, требуется перемножить матрицы преобразований последовательно расположенных звеньев:

$$\mathbf{A}(i-2,\ i) = \mathbf{A}(i-2,\ i-1)\,\mathbf{A}(i-1,\ i).$$

С помощью процедур *MULMAT* и *HOMOJ* можно вычислить параметры поло-жения и ориентации произвольной системы координат относительно любой другой си-стемы координат. Положение и ориентация системы координат m-го звена относительно базовой системы координат определяется следующим образом:

$$\mathbf{A}(0,\ m) = \mathbf{A}(0,\ 1)\,\mathbf{A}(1,\ 2)\ \ldots$$
$$\ldots \mathbf{A}(m-2,\ m-1)\,\mathbf{A}(m-1,\ m). \quad (6.2)$$

Кроме того, к последнему звену манипу-лятора обычно прикрепляется некоторый инструмент, являющийся частью рабочего органа. С этим инструментом также связы-вается система координат. Положение и ориентация системы координат инструмента относительно системы координат m-го зве-на обозначим *TOOLM*. Положение и ориен-тацию системы координат, связанной с ин-струментом, относительно базовой системы координат манипулятора обозначим *TOOLB*. Следует отметить, что *TOOLM* является константной матрицей, а *TOOLB* — функ-цией управляющих переменных сочленений. Имеет место следующее соотношение:

$$TOOLB = \mathbf{A}(0,\ m)\,TOOLM. \qquad (6.3)$$

6.2.4. Скорость перемещения рабочего органа

Скорость перемещения рабочего органа представляет собой функцию скоростей из-менения управляющих переменных сочле-нений. Процедура вычисления аналогична процедуре определения положения рабочего органа. Угловые и линейные скорости из-менения координат звеньев рассчитывают по очереди от звена к звену, начиная от ос-нования манипулятора. Если известны уг-ловая и линейная скорости системы коор-

динат i-го звена, то скорость системы ко-ординат $(i+1)$-го звена определяется в за-висимости от типа $(i+1)$-го сочленения.

Если i-е сочленение вращательное,

$$\mathbf{w}_{i+1} = \mathbf{w}_i + \mathbf{z}_i\dot{\mathbf{q}}_{i+1};$$
$$\mathbf{v}_{i+1} = \mathbf{v}_i + \mathbf{w}_{i+1} \times \mathbf{p}^*_{i+1}. \qquad (6.4)$$

Если i-е сочленение поступательное,

$$\mathbf{w}_{i+1} = \mathbf{w}_i;$$
$$\mathbf{v}_{i+1} = \mathbf{v}_i + \mathbf{z}_i\dot{\mathbf{q}}_{i+1} + \mathbf{w}_{i+1} \times \mathbf{p}^*_{i+1}, \qquad (6.5)$$

где $\mathbf{p}^*_{i+1} = \mathbf{p}_{i+1} - \mathbf{p}_i$, а знаком умножения обозначается векторное произведение.

Следующая процедура называется *VEL* (выходные параметры — $\mathbf{w}_{i+1}$, $\mathbf{v}_{i+1}$, входные параметры — $\mathbf{w}_i$, $\mathbf{v}_i$, $\mathbf{z}_i$, $\mathbf{p}^*_{i+1}$, $\dot{\mathbf{q}}_{i+1}$, $type_{i+1}$). Следует отметить, что $\mathbf{z}_i$ представляет собой первые три элемента третьего столб-ца матрицы $\mathbf{A}(0, i)$, а $\mathbf{p}_i$ состоит из пер-вых трех элементов четвертого столбца ма-трицы $\mathbf{A}(0, i)$. Таким образом, для вычис-ления $\mathbf{z}_i$ и $\mathbf{p}^*_{i+1}$ можно использовать про-цедуры *MULMAT* и *HOMOJ*. Переменная $type_{i+1}$ используется для передачи в про-цедуру информации о типе $(i+1)$-го сочле-нения (вращательное или поступательное), и, следовательно, определяет, какое соотно-шение — (6.4) или (6.5) — использовать для расчета скоростей звеньев.

Эти уравнения можно раскрыть и полу-чить соотношения для скоростей всех сочле-нений [16, 17]. Для манипулятора с шестью степенями подвижности угловая и линейная скорости изменения координат 6-го звена определяются следующим образом:

$$\mathbf{V}_6 = \mathbf{J}(\mathbf{q})\,\dot{\mathbf{q}}, \qquad (6.6)$$

где $\mathbf{V}_6$ — шестимерный вектор, состоящий из угловых и линейных скоростей системы координат 6-го звена:

$$\mathbf{V}_6 = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_6 \\ \mathbf{v}_6 \end{bmatrix}.$$

$\mathbf{J}(\mathbf{q})$ — матрица Якоби:

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = [\mathbf{s}_1\mathbf{s}_2\mathbf{s}_3 \ldots \mathbf{s}_6].$$

Столбцы матрицы $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ имеют вид:

$$\mathbf{s}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{j-1} \\ \mathbf{z}_{j-1} \times (\mathbf{p}_6 - \mathbf{p}_{i-1}) \end{bmatrix},$$

если звено вращательное, и

$$\mathbf{s}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{z}_{j-1} \end{bmatrix},$$

если звено поступательное; $\mathbf{0}$ — трехмерный нулевой вектор.

Матрица Якоби используется для реше-ния обратной кинематической задачи. Для вычисления матрицы Якоби используется процедура *JACOBI* с записью результата в массив $\mathbf{J}$ (выходной параметр — $\mathbf{J}$, входной параметр — $\mathbf{q}$). Следует отметить, что эле-менты $\mathbf{s}_j$ (j-й столбец матрицы $\mathbf{J}$) могут быть вычислены с помощью процедур *MULMAT* и *HOMOJ*.

6.2.5. Ускорения звеньев

Ускорения звеньев рассчитываются ана-логично скоростям. Если известно ускоре-ние системы координат i-го звена (враща-тельного), то ускорение системы координат $(i+1)$-го звена определяется следующим образом:

$$\dot{\mathbf{w}}_{i+1} = \dot{\mathbf{w}}_i + \mathbf{z}_i\ddot{\mathbf{q}}_{i+1} + \mathbf{w}_i \times \mathbf{z}_i\dot{\mathbf{q}}_{i+1}; \quad (6.7)$$
$$\dot{\mathbf{v}}_{i+1} = \dot{\mathbf{v}}_i + \dot{\mathbf{w}}_{i+1} \times \mathbf{p}^*_{i+1} + \mathbf{w}_{i+1} \times$$
$$\times (\mathbf{w}_{i+1} \times \mathbf{p}^*_{i+1}).$$

Если i-е звено поступательное,

$$\dot{\mathbf{w}}_{i+1} = \dot{\mathbf{w}}_i;$$
$$\dot{\mathbf{v}}_{i+1} = \dot{\mathbf{v}}_i + \mathbf{z}_i\ddot{\mathbf{q}}_{i+1} + \dot{\mathbf{w}}_{i+1} \times \mathbf{p}^*_{i+1} +$$
$$+ 2\mathbf{w}_{i+1} \times (\mathbf{z}_i\dot{\mathbf{q}}_{i+1}) + \mathbf{w}_{i+1} \times (\mathbf{w}_{i+1} \times \mathbf{p}^*_{i+1}). \quad (6.8)$$

Эти уравнения можно раскрыть и полу-чить выражения для ускорений каждого звена. Для манипулятора с шестью степе-нями подвижности уравнение для углового и линейного ускорения системы координат 6-го звена имеет вид:

$$\dot{\mathbf{V}}_6 = \mathbf{J}(\mathbf{q})\,\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\,\dot{\mathbf{q}}, \qquad (6.9)$$

где $\mathbf{V}_6$ и $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ определены выше.

Для вычисления $\dot{\mathbf{w}}_{i+1}$ и $\dot{\mathbf{v}}_{i+1}$ использует-ся процедура *ACCEL* (выходные парамет-ры — $\dot{\mathbf{w}}_{i+1}$, $\dot{\mathbf{v}}_{i+1}$, входные параметры — $\dot{\mathbf{w}}_i$, $\dot{\mathbf{v}}_i$, $\mathbf{w}_{i+1}$, $\mathbf{z}_i$, $\mathbf{p}^*_{i+1}$, $\dot{\mathbf{q}}_{i+1}$, $\ddot{\mathbf{q}}_{i+1}$, $type_{i+1}$). Вы-ходные параметры процедуры можно полу-чить, воспользовавшись процедурами *MULMAT*, *HOMOJ* и *VEL*. Параметр $type_{i+1}$ аналогичен описанному выше пара-метру процедуры *VEL*.

6.2.6. Обратная кинематическая задача

Траектории могут задаваться либо в ко-ординатах сочленений, либо в параметрах положения и ориентации рабочего органа.

Если используется второй способ, то для выработки управляющих сигналов системам сервоуправления параметры положения и ориентации рабочего органа должны быть преобразованы в параметры систем координат сочленений.

6.2.7. *Параметры положения сочленения*

Ниже описывается методика расчета параметров положения сочленений по заданным значениям параметров положения и ориентации рабочего органа. Произвольное позиционирование рабочего органа в пространстве может обеспечить манипулятор не менее чем с шестью степенями подвижности. Поэтому будем далее считать, что m — число степеней подвижности манипулятора — равно шести.

Обозначим однородное преобразование для рабочего органа — **Tr** (матрица размером 4×4). Эта матрица предоставляет исходные данные для процедуры решения обратной кинематической задачи. В задаче требуется определить значения управляющих переменных сочленений при условии, что положение и ориентация рабочего органа определяются матрицей **Tr**. Таким образом, требуется решить уравнение

$$TOOLB = \mathbf{Tr}.$$

Подставляя выражение для $TOOLB$ из соотношения (6.3), получаем для $\mathbf{A}(0, 6)$:

$$\mathbf{A}(0,\ 6) = \mathbf{Tr}(TOOLM)^{-1} = \mathbf{A}_d,$$

где $\mathbf{A}_d$ — исходное положение системы координат, связанной с 6-м звеном.

К сожалению, сходящегося алгоритма решения этого уравнения для произвольного манипулятора не существует. Тем не менее для большинства существующих манипуляторов такое решение можно найти. Для этого необходимо, чтобы все оси запястья манипулятора пересекались в одной точке. Тогда координаты этой точки определяются только значениями управляющих переменных первых трех сочленений. Если координаты можно определить по матрице **Tr**, то можно будет определить и значения управляющих переменных первых трех сочленений. После того, как они определены, можно определить и значения управляющих переменных остальных трех сочленений, удовлетворяющие заданной ориентации рабочего органа. Рассмотрим это на примере.

Рассмотрим манипулятор конструкции Стэнфордского института (рис. 6.3). Манипулятор имеет шесть сочленений: пять вращательных и одно поступательное. Кинематические параметры этого манипулятора приведены в табл. 6.1. Подставляя их в уравнение (6.1), получим $\mathbf{A}(i-1,\ i)$ (табл. 6.2).

6.1. Кинематические характеристики манипулятора Стэнфордского института

Номер звена	θ	d	α	a
1	Переменная	0	—90°	0
2	Переменная	16,2 см	90°	0
3	—90°	Переменная	0	0
4	Переменная	0	—90°	0
5	Переменная	0	90°	0
6	Переменная	24,7 см	0	0

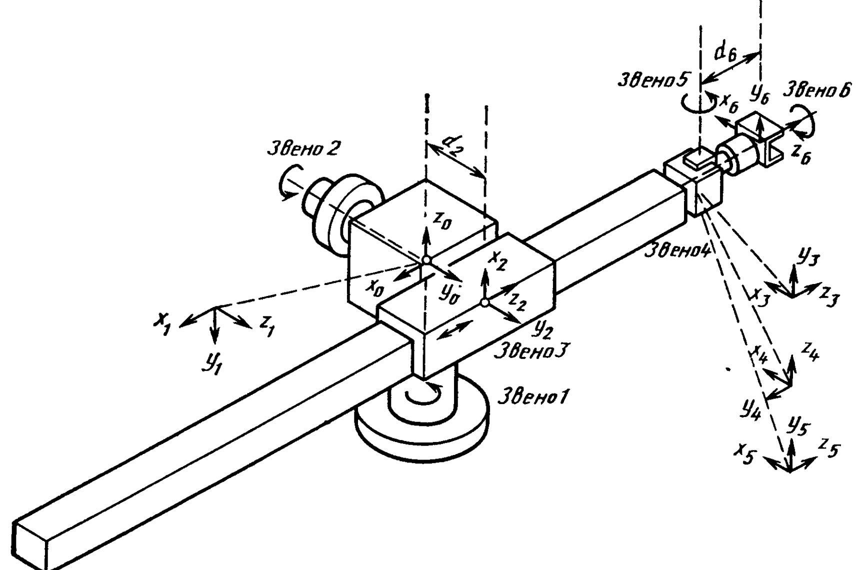


Рис. 6.3. Системы координат, связанные со звеньями манипулятора Стэнфордского института

6.2. Значения матриц A $(i-1,\ i)$ для манипулятора Стэнфордского института

$$\mathbf{A}(0,\ 1) = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \mathbf{A}(1,\ 2) = \begin{bmatrix} c_2 & 0 & s_2 & 0 \\ s_2 & 0 & -c_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}(2,\ 3) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad \mathbf{A}(3,\ 4) = \begin{bmatrix} c_4 & 0 & -s_4 & 0 \\ s_4 & 0 & c_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}(4,\ 5) = \begin{bmatrix} c_5 & 0 & s_5 & 0 \\ s_5 & 0 & -c_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \mathbf{A}(5,\ 6) = \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Примечание. c_i и s_i обозначают соответственно $\cos\theta_i$ и $\sin\theta_i$.

Из рис. 6.3 видно, что точка пересечения осей запястья совпадает с точкой, заданной координатами вектора $\mathbf{p}_3$ начала координат системы, связанной с третьим звеном. Ее координаты можно определить из $\mathbf{A}_d$

$$\mathbf{p}_3 = \mathbf{p}_d - d_6\mathbf{z}_d.$$

Вектор $\mathbf{p}_3$ состоит из первых трех элементов четвертого столбца матрицы $\mathbf{A}(0,\ 3)$. Из уравнения (6.2) имеем:

$$\mathbf{A}(0,\ 3) = \mathbf{A}(0,\ 1)\,\mathbf{A}(1,\ 2)\,\mathbf{A}(2,\ 3) = $$

$$= \begin{bmatrix} s_1 & c_1c_2 & c_1s_2 & -s_1d_2 + d_3c_1s_2 \\ c_1 & s_1c_2 & s_1s_2 & c_1d_2 + d_3s_1s_2 \\ 0 & -s_2 & c_2 & d_3c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Следовательно, θ_1, θ_2 и d_3 должны удовлетворять уравнению

$$\begin{bmatrix} -s_1d_2 + d_3c_1s_2 \\ c_1d_2 + d_3s_1s_2 \\ d_3c_2 \end{bmatrix} = \mathbf{p}_d - d_6\mathbf{z}_d. \qquad (6.10)$$

Кроме того, из рис. 6.3 видно, что длина вектора $\mathbf{p}_3$ определяется только значением параметра d_3. Следовательно, квадрат длины вектора $\mathbf{p}_3$ является функцией единственной управляющей переменной сочленения — d_3:

$$(\mathbf{p}_3)^2 = (d_2)^2 + (d_3)^2 = (\mathbf{p}_d - d_6\mathbf{z}_d)^2.$$

Следовательно,

$$d_3 = \{(\mathbf{p}_d - d_6\mathbf{z}_d)^2 - (d_2)^2\}^{1/2}.$$

Отметим, что отрицательные значения подкоренного выражения соответствуют недостижимому положению. Появление отрицательных значений под корнем означает, что неверно произведен расчет траектории, т. е. вычисление матрицы **Tr** однородного преобразования для рабочего органа.

Третий член уравнения (6.9) является функцией θ_2 и d_3. Следовательно, для θ_2 получаем:

$$\theta_2 = \pm \arccos \frac{(p_{dz} - d_6z_{dz})}{d_3},$$

где p_{dz} и z_{dz} определяют z-координаты векторов $\mathbf{p}_d$ и $\mathbf{z}_d$, знаки $\pm$ обозначают, что уравнение имеет два решения. Назовем их соответственно правосторонним и левосторонним.

После того, как θ_2 и d_3 определены, можно вычислить θ_1, используя либо первый член, либо второй член уравнения (6.9), либо оба их вместе. Воспользовавшись двумя членами, получим:

$$\begin{bmatrix} -d_2 & d_3s_2 \\ d_3s_2 & d_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ c_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{dx} - d_6z_{dx} \\ p_{dy} - d_6z_{dy} \end{bmatrix}.$$

ешая систему относительно s_1 и c_1, получаем:

$$= \frac{d_3 s_2 (p_{dy} - d_6 z_{dy}) - d_2 (p_{dx} - d_6 z_{dx})}{(d_2)^2 + (d_3 s_2)^2};$$

$$= \frac{d_3 s_2 (p_{dx} - d_6 z_{dx}) + d_2 (p_{dy} - d_6 z_{dy})}{(d_2)^2 + (d_3 s_2)^2}$$

$\theta_1 = \operatorname{atan2}(s_1, c_1)$, где atan 2 — стандартная функция вычисления арктангенса языка ФОРТРАН по заданным значениям синуса и косинуса угла.

Полученные значения s_1 и c_1 однозначно определяют квадрант, которому принадлежит значение угла θ_1. Если используется только один член, например p_{dx}, то уравнение принимает вид:

$$-s_1 d_2 + d_3 c_1 s_2 = p_{dx} - d_6 z_{dx}.$$

Это уравнение типа

$$a s_1 + b c_1 = c.$$

Решить это уравнение можно подстановкой значений s_1 и c_1 в виде функций от t_1, где — тангенс половинного угла θ_1. В результате имеем

$$\theta_1 = 2 \arctan(t_1),$$

где

$$t_1 = \frac{a \pm \{a^2 + b^2 - c^2\}^{1/2}}{b + c}.$$

Выбор знака определяется знаком и значением a, b и c.

Координаты рабочего органа определяются управляющими переменными первых трех сочленеений, а управляющие переменные остальных сочленений определяют его ориентацию. Отметим, что вращение запястья вокруг осей не меняет координат точки пересечения.

Прежде чем перейти к расчетам для трех сочленений запястья, необходимо получить матрицу однородного преобразования координат системы, связанной с шестым звеном, относительно системы координат третьего звена. Получаем:

$$\mathbf{A}(3, 6) = \mathbf{A}(3, 4)\,\mathbf{A}(4, 5)\,\mathbf{A}(5, 6) =$$

$$= \begin{bmatrix} c_4c_5c_6 - s_4s_6 & -c_4s_5s_6 - s_4c_6 & c_4s_5 & d_6c_4s_5 \\ s_4c_5c_6 + c_4s_6 & -s_4c_5s_6 + c_4s_6 & s_4s_5 & d_6s_4s_5 \\ -s_5c_6 & s_5c_6 & c_5 & d_6c_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \mathbf{A}(0, 3)^{-1}\mathbf{A}_d =$$

$$= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Отметим, что элементы матрицы a_{ij} зависят от исходной матрицы однородного преобразования и значений управляющих переменных первых трех сочленений, к данному моменту уже определенных. Следовательно, можно определить и a_{ij}. Элемент, находящийся на пересечении третьего столбца и третьей строки, который определяет значение угла θ_5

$$\theta_5 = \pm \arccos(a_{33}).$$

И снова возможны два решения. При известных θ_5, s_4 и c_4 можно выразить через элементы третьего столбца и первой и второй строк

$$s_4 = a_{23}/s_5;$$
$$c_4 = a_{13}/s_5$$

и

$$\theta_4 = \operatorname{atan2}(s_4, c_4).$$

При известных θ_5, s_6 и c_6 можно выразить через элементы третьей строки и первого и второго столбцов

$$s_6 = a_{32}/s_5;$$

$$c_6 = -a_{31}/s_5$$

и

$$\theta_6 = \operatorname{atan2}(s_6, c_6).$$

Приведенные уравнения нельзя использовать, если θ_5 равен нулю. В этом случае требуется выбрать одно решение из множества возможных. Если θ_5 равен нулю, матрица **A** (3, 6) принимает вид:

$$\mathbf{A}(3, 6) = \begin{bmatrix} c_{46} & -s_{46} & 0 & 0 \\ s_{46} & c_{46} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где

$$c_{46} = \cos(\theta_4 + \theta_6);$$
$$s_{46} = \sin(\theta_4 + \theta_6).$$

Следовательно,

$$c_{46} = a_{11};$$
$$s_{46} = a_{21}$$

и

$$\theta_4 + \theta_6 = \operatorname{atan2}(a_{21}, a_{11}). \qquad (6.11)$$

Таким образом, мы имеем множество решений. Обычно значение одного угла (например θ_6) выбирается произвольно, а значение другого угла рассчитывается по уравнению (6.11).

Для каждого конкретного манипулятора решение обратной кинематической задачи будет иметь свои особенности, но общие принципы решения сохраняются. Сначала для определения координат точки пересечения осей запястья рассчитываются значения управляющих переменных трех первых сочленений; затем для определения ориентации рабочего органа рассчитываются значения управляющих переменных остальных трех сочленений. Дополнительную информацию можно найти в [2] и [3].

Скорость решения обратной кинематической задачи имеет огромное значение. Поэтому рекомендуется использовать описанную выше процедуру. Однако в системах моделирования удобнее иметь универсальную процедуру, годящуюся для манипулятора любого типа. Обычно для этого решаются нелинейные кинематические уравнения методом Ньютона. Обозначим через $\mathbf{q}_1$ значения управляющих переменных сочленений в момент времени t_1, а через $\mathbf{q}_2$ значения управляющих переменных сочленений в момент времени t_2. Пусть $t_2 = t_1 + \Delta t$, где Δt — малое приращение времени. Обозначим через $\mathbf{x}(\mathbf{q}_1)$, $\mathbf{y}(\mathbf{q}_1)$, $\mathbf{z}(\mathbf{q}_1)$ и $\mathbf{p}(\mathbf{q}_1)$ значения столбцов матрицы $\mathbf{A}_6(\mathbf{q}_1)$ в момент времени t_1. Аналогично обозначим через $\mathbf{x}(\mathbf{q}_2)$, $\mathbf{y}(\mathbf{q}_2)$, $\mathbf{z}(\mathbf{q}_2)$ и $\mathbf{p}(\mathbf{q}_2)$ столбцы матрицы $\mathbf{A}_6(\mathbf{q}_2)$ в момент времени t_2. Для определения малых изменений положения и ориентации системы координат, связанной с шестым звеном, воспользуемся уравнением (6.6). Умножая обе части уравнения на Δt, имеем

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}_1)\Delta t\dot{\mathbf{q}} = \Delta t \mathbf{V}_6.$$

При этом

$$\Delta t\dot{\mathbf{q}} \simeq \Delta \mathbf{q} = \mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_1,$$

$$\Delta t \mathbf{V}_6 = \begin{bmatrix} \Delta t & \mathbf{w}_6 \\ \Delta t & \mathbf{v}_6 \end{bmatrix},$$

$$\Delta t \mathbf{w}_6 \simeq \frac{\mathbf{x}(\mathbf{q}_1) \times \mathbf{x}(\mathbf{q}_2) + \mathbf{y}(\mathbf{q}_1) \times}{2} \ldots \to$$

$$\to \ldots \frac{\times \mathbf{y}(\mathbf{q}_2) + \mathbf{z}(\mathbf{q}_1) \times \mathbf{z}(\mathbf{q}_2)}{} = \mathbf{e}_{ro},$$

$$\Delta t \mathbf{v}_6 \simeq \mathbf{p}(\mathbf{q}_2) - \mathbf{p}(\mathbf{q}_1) = \mathbf{e}_{rp},$$

где $\mathbf{e}_{ro}$ — вектор погрешности ориентации, а $\mathbf{e}_{rp}$ — вектор погрешности положения. Обозначим

$$\mathbf{e}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{ro} \\ \mathbf{e}_{rp} \end{bmatrix},$$

тогда

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}_1)\Delta \mathbf{q} \simeq \mathbf{e}_r. \qquad (6.12)$$

Решая уравнение относительно $\Delta \mathbf{q}$, получаем

$$\Delta \mathbf{q} \simeq \mathbf{J}(\mathbf{q}_1)^{-1}\mathbf{e}_r.$$

Для решения уравнения относительно $\Delta \mathbf{q}$ потребуются две вспомогательные процедуры: для вычисления $\mathbf{e}_r$ предназначена процедура *ERROR* [выходной параметр — $\mathbf{e}_r$, входные параметры — $\mathbf{A}_6(\mathbf{q}_1)$, $\mathbf{A}_6(\mathbf{q}_2)$], а для вычисления $\Delta \mathbf{q}$ по уравнению (6.13) предназначена процедура *RATE* (выходной параметр — $\Delta \mathbf{q}$, входные параметры — $\mathbf{q}_1$, $\mathbf{e}_r$).

Таким образом, мы можем определить смещение положения манипулятора в пространстве координат сочленений по смещениям положения и ориентации системы координат, связанной с шестым звеном. Чтобы применить этот метод для решения обратной кинематической задачи, предположим, что матрица $\mathbf{A}_6(\mathbf{q}_2)$ равна $\mathbf{A}_d$ — целевому значению матрицы однородного преобразования системы координат, связанной с шестым звеном. Полученное значение $\Delta \mathbf{q}$ рассматриваем как приближенное значение разности между текущими значениями управляющих переменных сочленений и их требуемыми значениями. Поскольку это решение приближенное, то для определения точных значений управляющих переменных сочленений используется итеративная процедура.

Алгоритм 2. Обратная кинематическая задача

Шаг 1. Для $i = 0$ задать приближенные значения управляющих переменных сочленений — $\mathbf{q}_i$.

Шаг 2. С помощью процедуры *ERROR* [выходной параметр — $\mathbf{e}_r$, входные параметры — $\mathbf{A}_6(\mathbf{q}_1)$, $\mathbf{A}_d$] вычислить вектор погрешностей $\mathbf{e}_r$.

Шаг 3. Оценить разность между $\mathbf{q}_i$ и приближенными значениями управляющих переменных с помощью процедуры *RATE* (выходной параметр — $\Delta \mathbf{q}_i$; входные параметры $\mathbf{q}_i$, $\mathbf{e}_r$).

Шаг 4. Установить $\mathbf{q}_{i+1} = \mathbf{q}_i + \Delta \mathbf{q}_i$.

Шаг 5. Если величина $\Delta \mathbf{q}_i$ удовлетворяет заданному критерию выхода из процедуры, прекратить вычисления, в противном случае — продолжить.

Шаг 6. Установить $i = i + 1$ и перейти на шаг 2.

Процедура *REVKIN* (выходной параметр — $\mathbf{q}$, входной параметр — $\mathbf{A}_d$) реализует Алгоритм 2 решения обратной кинематической задачи. Напомним, что требуются еще и вспомогательные процедуры *ERROR* и *RATE*. Из процедуры *RATE*, кроме того, производится обращение к процедуре решения линейного уравнения. Библиотечная процедура *LIN* (выходной параметр — $\mathbf{y}$, входные параметры — $\mathbf{B}$, $\mathbf{x}$) предназначена для решения линейного уравнения вида

$$\mathbf{y} = \mathbf{B}\mathbf{x}.$$

При решении уравнения (6.12) сталкиваемся с теми же ограничениями, что и при решении любого другого линейного уравнения. Единственное решение может быть получено, если матрица Якоби не вырождена. Если матрица Якоби вырождена, то либо уравнение не имеет решений, либо существует множество решений. Процедура реше-

ия линейного уравнения *LIN* должна учивать возможность вырожденности матри-ы Якоби и в любом случае выдавать имеюее смысл решение. Если имеется множево решений, то выбор решения можно уществить, например, по критерию минилума значения суммы квадратов разностей 1]. Кроме того, необходимо отметить, что атрица Якоби может быть еще и плохо бусловленной. Это происходит, когда матща Якоби близка к вырожденной. При том корни уравнения становятся очень увствительны к изменению значений элеентов матрицы. Малые погрешности в выислении элементов матрицы Якоби привоят к большому разбросу получаемых реультатов.

6.2.8. *Скорости сочленений*

Как было показано выше, скорость дви-ения рабочего органа может быть рассчина по уравнениям (6.4) и (6.5). А зная корость рабочего органа, можно опредеить скорость изменения управляющих переенных сочленений, решив линейное уравнеие [16, 17]:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})^{-1}\mathbf{V}_6.$$

тметим, что для определения скоростей очленений можно воспользоваться описаной выше процедурой *RATE* (выходной параметр — $\dot{\mathbf{q}}$, входные параметры — $\mathbf{q}$, $\mathbf{V}_6$).

6.2.9. *Ускорения сочленений*

Ускорения управляющих переменных соленений можно определить по уравнению налогично определению скоростей:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})^{-1}[\dot{\mathbf{V}}_6 - \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}],$$

ля определения ускорений сочленений моно воспользоваться процедурой *RESACC* выходной параметр — $\ddot{q}$, входные парамет-ы — $\dot{\mathbf{V}}_6$, $\mathbf{q}$, $\dot{\mathbf{q}}$). Отметим, что значение $(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$ можно получить с помощью процеду-ы *ACCEL* (), задав в ней нулевые значе-ия входных параметров ускорения сочле-ений.

6.3. Динамика манипулятора

Ниже описывается модель манипулятора, спользуемая при проектировании системы правления.

6.3.1. *Разомкнутая схема*

Манипуляторы могут быть разделены на ва класса: построенные по замкнутой или азомкнутой кинематической схеме. Практически все манипуляторы построены по замкнутой кинематической схеме. Даже электромеханические манипуляторы, которые строятся обычно по разомкнутой схеме, содержат замкнутые кинематические системы передач, установленные на выходных валах электродвигателей. Мы рассмотрим разомкнутую схему манипулятора, так как она проще и содержит все основные идеи построения манипуляторов других типов.

Уравнение движения манипулятора может быть записано в виде

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{k} = \mathbf{u}. \quad (6.13)$$

Это уравнение используется при моделировании и разработке алгоритмов управления. Для тех же целей используются методы решения прямой и обратной задач динамики, рассматриваемые ниже. Но сначала следует рассмотреть некоторые общие вопросы динамики манипулятора.

Если известны угловые и линейные ускорения всех звеньев, то линейные ускорения центров масс этих звеньев можно определить из уравнения

$$\dot{\hat{\mathbf{v}}}_i = \dot{\mathbf{v}}_i + \dot{\mathbf{w}}_i \times \mathbf{r}_i + \mathbf{w}_i \times (\mathbf{w}_i \times \mathbf{r}_i). \quad (6.14)$$

Отметим, что угловые скорость и ускорение **центра масс** i**-го** звена равны соответствующим значениям для системы координат i-го звена. Для вычисления **линейного ускорения** центра масс i-го звена применяется процедура *ACCNT* (выходной параметр — $\dot{\hat{\mathbf{v}}}_i$, входные параметры — $\dot{\mathbf{v}}_i$, $\dot{\mathbf{w}}_i$, $\mathbf{r}_i$).

После того, как будут вычислены угловые скорости, угловые ускорения и линейные ускорения центров масс всех звеньев, можно перейти к определению суммарных сил и моментов, приложенных к соединениям, по уравнениям Ньютона — Эйлера [19]

$$\mathbf{F}_i = mass_i \dot{\hat{\mathbf{v}}}_i;$$

$$\mathbf{N}_i = \mathbf{I}_i\dot{\mathbf{w}}_i + \mathbf{w}_i \times (\mathbf{I}_i\mathbf{w}_i). \quad (6.15)$$

Для вычисления значений $\mathbf{F}_i$ и $\mathbf{N}_i$ для каждого звена манипулятора по соотношениям (6.15) применяется процедура *TOTFOR* (выходные параметры — $\mathbf{F}_i$, $\mathbf{N}_i$, входные параметры — $mass_i$, $\mathbf{I}_i$, $\mathbf{w}_i$, $\dot{\mathbf{w}}_i$, $\dot{\hat{\mathbf{v}}}_i$).

Отметим, что $\mathbf{I}_i$ и $\mathbf{r}_i$ являются функциями параметров положения и ориентации i-го звена, а $\hat{\mathbf{I}}_i$ и $\hat{\mathbf{r}}_i$ — константы. Они связаны следующими соотношениями:

$$\mathbf{I}_i = \mathbf{D}_i\hat{\mathbf{I}}_i(\mathbf{D}_i)';$$

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{D}_i\hat{\mathbf{r}}_i,$$

где $\mathbf{D}_i$ — левая верхняя часть матрицы $\mathbf{A}_i(\mathbf{q})$ размерностью 3×3. Для вычисления $\mathbf{I}_i$ и $\mathbf{r}_i$ по этим соотношениям предназначена процедура *TRFIN* (выходные параметры — $\mathbf{I}_i$, $\mathbf{r}_i$, входные параметры — $\mathbf{A}_i(\mathbf{q})$, $\hat{\mathbf{I}}_i$, $\hat{\mathbf{r}}_i$).

Суммарные сила и момент, приложенные к i-му звену, складываются из сил и моментов, действующих со стороны $(i-1)$-го и $(i+1)$-го звеньев, и силы и момента, вызванных земным тяготением. Если $i = m$, то $\mathbf{f}_{m+1}$ и $\mathbf{n}_{m+1}$ не существуют, так как не существует $(m+1)$-го звена. Следовательно, $\mathbf{f}_{m+1}$ и $\mathbf{n}_{m+1}$ равны нулю. При решении обратной динамической задачи им обычно присваиваются значения внешних сил и момента, приложенных к m-му соединению.

Воздействие гравитационных сил может быть учтено в модели в уравнениях (6.7) и (6.8) приравниванием линейного ускорения основания $\dot{\mathbf{v}}_0$ к величине ускорения, развиваемого под действием гравитации, а $\dot{\mathbf{w}}_0$ — к нулю. Воздействие гравитации будет автоматически учтено в $\mathbf{F}_i$ и $\mathbf{N}_i$. В уравнениях (6.4) и (6.5) $\mathbf{w}_0$ и $\mathbf{v}_0$ равны нулю.

Суммарная сила и момент, приложенные к i-му звену, равны:

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{f}_i - \mathbf{f}_{i+1};$$

$$\mathbf{N}_i = \mathbf{n}_i - \mathbf{n}_{i+1} - (\mathbf{p}_i^* + \mathbf{r}_i) \times \mathbf{f}_i + \mathbf{r}_i \times \mathbf{f}_{i+1},$$

решая относительно $\mathbf{f}_i$ и $\mathbf{n}_i$, имеем

$$\mathbf{f}_i = \mathbf{F}_i + \mathbf{f}_{i+1};$$

$$\mathbf{n}_i = \mathbf{N}_i + \mathbf{n}_{i+1} - (\mathbf{p}_i^* + \mathbf{r}_i) \times \mathbf{f}_i + \mathbf{r}_i \times \mathbf{f}_{i+1}. \quad (6.16)$$

Для вычисления значений $\mathbf{f}_i$ и $\mathbf{n}_i$ по уравнениям (6.16) используется процедура *LINKFOR* (выходные параметры — $\mathbf{f}_i$ и $\mathbf{n}_i$, входные параметры — $\mathbf{F}_i$, $\mathbf{N}_i$, $\mathbf{f}_{i+1}$, $\mathbf{n}_{i+1}$, $\mathbf{p}_i^*$, $\mathbf{r}_i$).

В результате проекция $\mathbf{f}_i$ и $\mathbf{n}_i$ на ось i-го сочленения, $\mathbf{u}_i$, равна

$$\mathbf{u}_i = \begin{cases} \mathbf{z}'_{i-1}\mathbf{n}_i, & \text{если звено поступательное;} \\ \mathbf{z}'_{i-1}\mathbf{f}_i, & \text{если звено вращательное.} \end{cases} \quad (6.17)$$

Для определения значения $\mathbf{u}_i$ по уравнению (6.17) применяется процедура *TOTFOR* (выходной параметр — $\mathbf{u}_i$, входные параметры — $\mathbf{z}_{i-1}$, $\mathbf{n}_i$, $\mathbf{f}_i$, $type_i$).

Так косвенным путем получаем значение функции $\mathbf{u}$ из уравнения (6.13). Более эффективную вычислительную процедуру можно построить, выразив в приведенных выше уравнениях все численные величины, связанные с i-м звеном, в системе координат i-го звена [6]. В результате этого вычислительная процедура упрощается, так как отпадает необходимость вычисления $\mathbf{r}_i$ и $\mathbf{I}_i$.

6.3.2. *Обратная динамическая задача*

Для целей управления важно иметь возможность очень быстро вычислять значения моментов, которые следует развивать приводам сочленений в процессе отслеживания траекторий. Если вычислительная мощность процессора ограничена, вычисляются приближенные значения этих величин [3, 18]. Однако, если приведенные выше уравнения используются в системе моделирования или если вычислительная мощность процессора достаточно велика, вычисление производится непосредственно по выведенным ниже уравнениям. Значения моментов, развиваемых приводами, определяются в результате решения обратной динамической задачи. По приведенному ниже алгоритму производится определение величины моментов, необходимых для перемещения манипулятора в соответствии с заданными значениями координат, скорости и ускорения управляющих переменных звеньев.

Алгоритм 3. Обратная задача динамики

Шаг 1. Установить $i = 0$, $\mathbf{A}(0, 0) = \mathbf{I}$ — единичная матрица, $\mathbf{w}_0 = \dot{\mathbf{w}}_0 = \mathbf{v} = 0$.

Шаг 2. Определить $\mathbf{A}(0, i+1)$, предварительно вычислив матрицу $\mathbf{A}(i, i+1)$ с помощью процедуры *HOMOJ* (выходной параметр — $\mathbf{A}(i, i+1)$, входной параметр — $i+1$) и умножив ее на $\mathbf{A}(0, i)$ с помощью процедуры *MULMAT* (выходной параметр — $\mathbf{A}(0, i+1)$, входные параметры — $\mathbf{A}(0, i)$, $\mathbf{A}(i, i+1)$).

Шаг 3. С помощью процедуры *TRNINT* (выходные параметры — $\mathbf{I}_{i+1}$, $\mathbf{r}_{i+1}$, входные параметры — $\mathbf{A}(0, i+1)$, $\hat{\mathbf{I}}_{i+1}$, $\hat{\mathbf{r}}_{i+1}$) вычислить $\mathbf{I}_{i+1}$ и $\mathbf{r}_{i+1}$.

Шаг 4. С помощью процедуры *VEL* (выходные параметры — $\mathbf{w}_{i+1}$, v_{i+1}, входные параметры — $\mathbf{w}_i$, $\mathbf{v}_i$, $\mathbf{z}_i$, $\mathbf{p}_{i+1}^*$, $\mathbf{q}_{i+1}$) вычислить $\mathbf{w}_{i+1}$ и $\mathbf{v}_{i+1}$.

Шаг 5. С помощью процедуры *ACCEL* (выходные параметры — $\dot{\mathbf{w}}_{i+1}$, $\dot{\mathbf{v}}_{i+1}$, входные параметры — $\dot{\mathbf{w}}_i$, $\dot{\mathbf{v}}$, $\mathbf{w}_i$, $\mathbf{z}_i$, $\mathbf{p}_{i+1}^*$, $\dot{\mathbf{q}}_{i+1}$, $\ddot{\mathbf{q}}_{i+1}$, $tape_{i+1}$) вычислить $\dot{\mathbf{w}}_{i+1}$ и $\dot{\mathbf{v}}_{i+1}$.

Шаг 6. С помощью процедуры *ACCNT* (выходной параметр — $\dot{\hat{\mathbf{v}}}_i$, входные параметры — $\dot{\mathbf{v}}_i$, $\dot{\mathbf{w}}_i$, $\mathbf{r}_i$) вычислить $\dot{\hat{\mathbf{v}}}_{i+1}$.

Шаг 7. С помощью процедуры *TOTFOR* выходные параметры — $\mathbf{F}_{i+1}$, $\mathbf{N}_{i+1}$, входные параметры — $\mathbf{I}_{i+1}$, $\mathbf{w}_{i+1}$, $\hat{\mathbf{w}}_{i+1}$, $\dot{\mathbf{w}}_{i+1}$, $\mathbf{\hat{v}}_{i+1}$) вычислить $\mathbf{F}_{i+1}$ и $\mathbf{N}_{i+1}$.

Шаг 8. Установить $i = i + 1$.

Шаг 9. Если $i < m$, то перейти на шаг 2, иначе продолжить.

Шаг 10. Установить значения $\mathbf{f}_{m+1}$ и $\mathbf{n}_{m+1}$, равными соответственно силе и моменту, выраженным в системе координат m-го звена и представляющим собой равнодействующие всех внешних сил и моментов, приложенных к m-му звену:

$$[\mathbf{n}'_{m+1}\mathbf{f}'_{m+1}] = \mathbf{k}'.$$

Шаг 11. Вычислить $\mathbf{f}_i$ и $\mathbf{n}_i$ с помощью процедуры *LINKFOR* (выходные параметры — $\mathbf{f}_i$, $\mathbf{n}_i$, входные параметры — $\mathbf{F}_i$, $\mathbf{N}_i$, $\mathbf{f}_{i+1}$, $\mathbf{n}_{i+1}$, $\mathbf{p}_i^*$, $\mathbf{r}_i$).

Шаг 12. С помощью процедуры *TOTFOR* (выходной параметр — u_i, входные параметры — $\mathbf{z}_{i-1}$, $\mathbf{n}_i$, $\mathbf{f}_i$, $type_i$) вычислить u_i.

Шаг 13. Установить $i = i - 1$.

Шаг 14. Если $i = 0$, то конец работы алгоритма, иначе перейти на шаг 10.

Процедуру *INVDYN* (выходной параметр — $\mathbf{u}$, входные параметры — $\mathbf{q}$, $\dot{\mathbf{q}}$, $\ddot{\mathbf{q}}$, $\dot{\mathbf{v}}_0$, $\mathbf{k}$) реализует описанный алгоритм и вычисляет силы или моменты для приводов по данным значениям координат, скоростей и ускорений для управляющих переменных сочленений, внешним силам и моментам, приложенным к рабочему органу и ускорению движения системы координат нулевого звена (основания).

6.3.3. Прямая динамическая задача

Задача, обратная рассматриваемой в предыдущем разделе, называется прямой динамической задачей. Для моделирования манипулятора необходимо знать состояние манипулятора и производную состояния. Параметрами состояния являются значения и скорости изменения управляющих переменных сочленений. Скорость, производная значения переменной, при моделировании задается. Производной от скорости является ускорение, которое можно определить из уравнения (6.13). Если ввести вектор $\mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{k})$, равный

$$\mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{k}) = \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}(\mathbf{q}')\mathbf{k},$$

то ускорение управляющих переменных сочленений можно определить, решив линейное уравнение

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{u} - \mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{k}). \qquad (6.18)$$

Величину вектора $\mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{k})$ можно получить из уравнения (6.12) с помощью процедуры *INVDYN* (выходной параметр — $\mathbf{b}$, входные параметры — $\mathbf{q}$, $\dot{\mathbf{q}}$, 0, $\dot{\mathbf{v}}_0$, $\mathbf{k}$), приравняв ускорение звена к нулю. Полученное значение $\mathbf{u}$ будет равно вектору $\mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{k})$.

Остается определить только матрицу $\mathbf{H}(\mathbf{q})$. Это можно сделать с помощью процедуры *INVDYN* (выходной параметр — $\mathbf{h}_i$, входные параметры — $\mathbf{q}$, 0, $\mathbf{e}_i$, 0, 0). При этом приравниваются к нулю следующие входные параметры: скорость изменения управляющих переменных сочленений, ускорение, обусловленное воздействием гравитации, внешние силы и моменты и ускорения управляющих переменных всех звеньев, кроме q_i, который приравнивается к единице. Таким образом, $\mathbf{e}_i$ представляет собой вектор, все компоненты которого равны нулю, кроме i-го, который равен единице. Согласно (6.12) вместо выходного параметра в процедуре вычисляется вектор $\mathbf{h}_i$ — i-й столбец матрицы $\mathbf{H}(\mathbf{q})$. Вызывая процедуру для каждого столбца, можно вычислить всю матрицу, а затем подставить ее в уравнение (6.18) для вычисления ускорений управляющих переменных сочленений.

Расчет ускорений управляющих переменных сочленений по известным силам, приложенным к звеньям, состоянию манипулятора, внешним силам и моментам, действующим на рабочий орган, и ускорению, обусловленному действием гравитации, может быть выполнен по следующему алгоритму.

Алгоритм 4. Прямая задача динамики

Шаг 1. С помощью процедуры *INVDYN* (выходной параметр — $\mathbf{b}$, входные параметры — $\mathbf{q}$, $\dot{\mathbf{q}}$, 0, $\dot{\mathbf{v}}_0$, $\mathbf{k}$) вычислить вектор $\mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{k})$.

Шаг 2. Установить $i = 1$.

Шаг 3. С помощью процедуры *INVDYN* (выходной параметр — $\mathbf{h}_i$, входные параметры — $\mathbf{q}$, 0, $\mathbf{e}_i$, 0) вычислить (i-й столбец матрицы моментов инерции $\mathbf{H}(\mathbf{q})$).

Шаг 4. Установить $i = i + 1$.

Шаг 5. Если $i \leqslant m$, то перейти на шаг 3, иначе продолжить.

Шаг 6. С помощью процедуры *LIN* (выходной параметр — $\mathbf{q}$, входные параметры — $\mathbf{H}(\mathbf{q})$, $\mathbf{u} - \mathbf{b}$) вычислить ускорения звеньев.

Шаг 7. Конец.

Процедура *FORDYN* (выходной параметр — $\ddot{\mathbf{q}}$, входные параметры — $\mathbf{q}$, $\dot{\mathbf{q}}$, $\dot{\mathbf{v}}_0$, $\mathbf{k}$, $\mathbf{u}$) реализует этот алгоритм и используется на каждом шаге моделирования для вычисления ускорений сочленений. Интегрируя ускорения управляющих переменных сочленений, можно определить скорость и значения этих переменных. Вопросы моделирования движения манипулятора, построенного по разомкнутой схеме, с помощью уравнений Ньютона — Эйлера хорошо освещены в [4, 5, 8].

6.3.4. Общие программы расчета манипуляторов

В конструкции большинства промышленных манипуляторов содержится много замкнутых кинематических цепей. Например, по замкнутой схеме построены приводы звеньев, которые состоят из двигателя постоянного тока и редукторов. Для приближенного расчета можно включить массу двигателя и редуктора в массу звена, пренебречь моментами вращения ротора и зубчатых колес и воспользоваться моделью для разомкнутой цепи. Если величина пренебрегаемых моментов мала по сравнению с моментами, приложенными к звеньям манипулятора, то можно ожидать хорошего соответствия модели реальной системе.

Для расчета сложных механических систем предназначены более мощные программные средства анализа. К таким программам общего назначения относятся АДАМС, ИМП, ДРЭМ, МЕДУЗА и ДАЙМАК [9, 10, 14, 21—26].

6.4. Заключение

В этой главе освещены некоторые вопросы теории и практики решения основных задач кинематики и динамики манипулятора. Для кинематического анализа применяется аппарат однородных преобразований, связывающих положения и ориентации систем координат звеньев. В разделах, посвященных прямой и обратной задачам кинематики, описана методика преобразования координат, скоростей и ускорений из системы координат звена в систему координат сочленения и обратно. Выводятся уравнения движения манипуляторов, построенных по разомкнутой схеме. При составлении уравнений движения манипулятора используются результаты кинематического анализа. Приводятся ссылки на методы построения динамических моделей для более сложных систем.

Пользуясь приведенным материалом, можно построить набор процедур, автоматизирующих проектирование и моделирование манипулятора. Некоторые процедуры описываются подробно, приводятся уравнения и алгоритмы. Описанные процедуры дают хорошие результаты при проектировании, моделировании и управлении манипулятором. Они рассматриваются в следующей последовательности: прямая задача кинематики, обратная задача кинематики, прямая задача динамики. Авторы надеются, что приведенный материал не только даст читателю некоторые полезные практические средства, но и поможет ему лучше понять основные вопросы кинематики и динамики манипулятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Denavit, J., and Hartenberg, R. S., A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices, *ASME Journal of Applied Mechanics*, June 1965, pp. 215—221.
2. Mayer, G. E., A Systematic Approach for Obtaining Solutions to the Kinematic Equations of Simple Manipulators, Master of Science Thesis, Purdue University, July 1979.
3. Paul, R. P., *Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control*, MIT Press, Cambridge, MA, 1981.
4. Orin, D. E., McGhee, R. B., Vukobratovic, M., and Hartoch, G., Kinematic and Kinetic Analysis of Open-Chain Linkages Utilizing Newton-Euler Methods, *Mathematical Biosciences*, Vol. 43, No. 1/2, February 1979, pp. 107—130.
5. Stepanenko, Y., and Vukobratovic M., Dynamics of Articulated Open-Chain Active Mechanisms, *Mathematical Biosciences*, Vol. 28, No. 1/2, 1976.
6. Luh, J. Y. S., Walker, M. W., and Paul, R. P. C., On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 102, June 1980, pp. 69—76.
7. Hollerbach, J. M., A Recursive Lagrangian Formulation of Manipulator Dynamics and a Comparative Study of Dynamics and a Comparative Study of Dynamics Formulation Complexity, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-10, No. 11, Nov. 1980, pp. 730—736.
8. Walter, M. W., and Orin, D. E., Efficient Dynamic Computer Simulation of Robotic Mechanisms, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, September 1982, Vol. 104, pp. 205—211.
9. Paul, B., Analytical Dynamics of Mechanisms — A Computer Oriented Overview, *Mechanism and Machine Theory*, 1975, Vol. 10, Pergamon Press, New York, pp. 481—507.

0. Kaufman, R. E., Mechanism Design by Computer, *Machine Design*, October 28, 1978, pp. 94—100.
1. Nobel, B., *Applied Linear Algebra*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1969.
2. Renaud, M., Coordinated Control of Robots-Manipulators: Determination of the Singularities of the Jacobian Matrix, *Proceedings First Yugoslav Symposium on Industrial Robotics and Artificial Intelligence*, Dubrovnik, September 13—15, 1979, pp. 153—165.
3. Uicker, J. J. Jr., Denavit, J., and Hartenberg, R. S., An Iterative Method for the Displacement Analysis of Spatial Mechanisms, *ASME Journal of Applied Mechanics*, June 1966, pp. 309—314.
4. Uicker, J. J. Jr., Dynamic Behavior of Spatial Linkages, Part 1: Exact Equations of Motion; Part 2: Small Oscillations About Equilibrium, *ASME Journal of Engineering for Industry*, February 1969, pp. 251—265.
5. Paul, R. P., Modeling, Trajectory Calculation and Servoing of a Computer Controlled Arm, Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, AIM 177, 1972.
6. Whitney, D. E., Resolved Motion Rate Control of Manipulators and Human Prosthesis, *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, Vol. MMS-10, No. 2, June 1969, pp. 47—53.
7. Whitney, D. E., The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, December 1972, pp. 303—309.
8. Bejczy, A. K., Robot Arm Dynamics and Control, JPL Technical Memorandum 33—669, February 1974.
9. Symon, K. R., *Mechanics*, Addison-Wesley, New York, 1961.
0. Wertz, J. R., *Spacecraft Attitude Determination and Control*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1978.
1. Sheth, P. N., and Uicker, J. J. Jr., IMP (Integrated Mechanism Program): A Computer-Aided Design Analysis System for Mechanisms and Linkages, *Transactions ASME, Journal of Engineering in Industry, 94 Ser. B*, 1972, pp. 454—466.
22. Sheth, P. N., A Digital Computer Based Simulation Procedure for Multiple Degree of Freedom Mechanical Systems with Geometric Constraints, Ph. D. Thesis, University of Wisconsin, Madison, 1972.
23. Uicker, J. J. Jr., User's Guide for IMP (Integrated Mechanism Program): A Problem Oriented Language for the Computer-Aided Design and Analysis of Mechanisms, NSF Rep. Res. Grant GK-4552, University of Wisconsin, Madison, 1973.
24. Chace, M. A., and Sheth, P. N., Adaptation of Computer Techniques to the Design of Mechanical Dynamic Machinery, ASME paper 73-DET-58, 1973.
25. Dix, R. C., and Lehman, T. J., Simulation of the Dynamics of Machinery, *Transactions ASME, Journal of Engineering in Industry, 94 Ser. B*, 1972, pp. 433—438.
26. Orlandea, N., Node-Analogous, Sparsity-Oriented Methods for Simulation of Mechanical Dynamic Systems, Ph. D. Dissertation, University of Michigan, 1973.

Глава 7
УСТРОЙСТВО ЗАХВАТОВ

П. Райт, М. Кутовски,
Университет Карнеги-Мелон, г. Питтсбург, шт. Пеннсильвания

7.1. Введение

К промышленным роботам хорошо подходит известный афоризм Джона Мильтона: «человек — не остров». Робот предназначен для взаимодействия с окружающей средой. Это взаимодействие состоит в совершении операций над объектами и инструментами в процессе выполнения задания. Звеном, связывающим программно управляемый манипулятор с внешним миром, служит захват, или рабочий орган. Конструкция захвата должна это отражать, в ней должны учитываться как возможности робота, так и специфика задания. Идеальный захват должен наилучшим образом соответствовать трем независимым задачам (рис. 7.1).

Первые промышленные роботы были практически «островами». В основном они использовались в качестве автономного оборудования для окраски, точечной сварки или переноски деталей, причем переноска производилась без учета ориентации деталей в начальном и конечном положении. Для переноски использовались простейшие клювовидные захваты, и возможности робота не превышали возможности человека, вооруженного каминными щипцами.

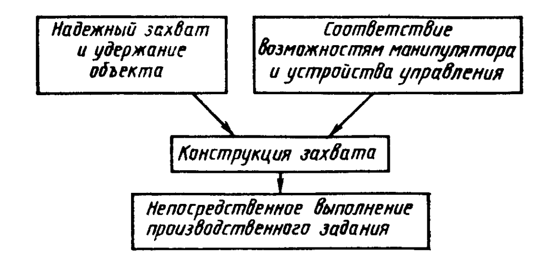


Рис. 7.1. Назначение захвата

В дальнейшем роботы стали использоваться на более сложных операциях. Они научились захватывать объекты сложной формы, бьющиеся предметы. Задания могли включать в себя операции по сборке деталей или установке их в ячейки и зажимы. В подобных заданиях особое внимание уделяется точности работы манипулятора и захвата. После того как деталь захвачена, она должна быть надежно зафиксирована с точным соблюдением положения и ориентации относительно манипулятора. В процессе сборки, например, между захваченной деталью и другими сборочными единицами возникают силовые взаимодействия. В конструкции робота эти взаимодействия должны быть учтены, поскольку именно действиями робота и его захвата определяется, будут ли повреждены детали. В процессе сборки пальцы захвата не должны проскальзывать, а конструкция захвата в целом должна способствовать гашению возникающих контактных усилий.

В зависимости от типа задания функции робота и захвата могут быть различными. То же самое происходит, когда человек в различных ситуациях выбирает способ захвата предмета рукой. Если требуется передать карандаш кому-либо, то человек берет его совсем не так, как берет конверт с письмом. Важнейшее свойство человеческой руки заключается в том, что ею можно выполнять самые различные действия: писать карандашом, месить тесто, действовать на ощупь в темноте, играть на гитаре и многое другое. Кроме выполнения функций захвата человеческая рука является также органом осязания и средством коммуникации. По сравнению с ней другие захваты слишком несовершенны (см. разд. 7.3), хотя последние модели обладают некоторой технологической гибкостью. Однако было бы неверно считать, что аналог руки человека представляет собой идеальный захват для промышленного робота. В производстве находит применение лишь малая часть ее возможностей. С другой стороны, рука человека не является лучшим вариантом захвата, и именно поэтому люди пользуются плоскогубцами, гаечными ключами, пинцетами, рабочими рукавицами и другими вспомогательными инструментами.

7.2. Захват и захватывание

Процесс захватывания для человека состоит в выборе способа захвата предмета рукой, взятия или поднимания его при контроле за его положением. Реакция на внешние или внутренние события вырабатывается через органы зрения и мозг. Затем человек приближает свою руку к объекту, производит захватывание и выполняет намеченные действия. Управление этим процессом осуществляется по двум контурам обратной связи (рис. 7.2): через органы зрения контролируется положение руки, а посредством осязания корректируются сила сжатия и усилия пальцев.

Захват определяется его предназначением (пример с карандашом в предыдущем разделе). В процессе захватывания ведущую роль играет выбор захвата. На сильно упрощенной блок-схеме (рис. 7.3) изображены основные действия, составляющие процесс захватывания, и взаимосвязи между ними. По этому поводу в последнее время появилось несколько публикаций. Вопрос распределения усилий между пальцами при удержании предмета исследовали Асада [1, 2], Кутовски [3] и Солсбери [4, 5]. Асада и Кутовски [3] рассмотрели задачу выбора оптимального положения пальцев

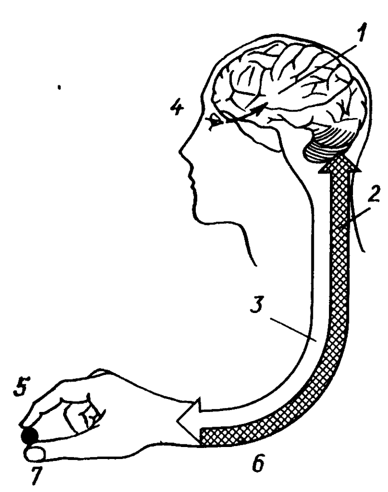


Рис. 7.2. Выполняемый человеком процесс захватывания:

1 — головной мозг; *2* — проводящие пути чувственной информации; *3* — проводящие пути моторной информации; *4* — визуальное управление; *5* — осязание; *6* — силомоментное управление; *7* — захват

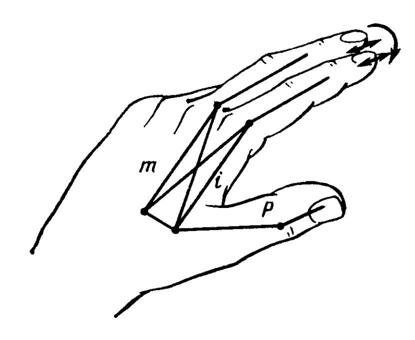


Рис. 7.4. Захват руки человека тремя пальцами

для захвата данного объемного предмета. Например, если известны силы сжатия пальцев и трение, то можно построить оптимальный жесткий захват, способный выдерживать значительные скручивающие усилия без проскальзывания. В частности, по методике Асада [1, 2] и Кутовски [3] можно выбрать наиболее безопасное расположение трех пальцев промышленного манипулятора (см. рис. 7.17) для поднятия со стола пепельницы неправильной формы.

Принципы управления многозвенными трехпалыми захватами описаны в [4, 7]. По этим принципам были построены малые манипуляторы, которые могут, в частности, навинчивать гайки на болты. Для выполнения этой операции необходимо управлять вращательным движением концов пальцев вокруг объекта. Существует несколько вариантов построения манипуляторов с активной замкнутой системой управления пальцами. В исследовательских лабораториях было построено несколько манипуляторов этого типа. Однако в ближайшие пять лет манипуляторы с системой замкнутого управления пальцами вряд ли будет целесообразно применять в промышленности. Это объясняется сложностью механической конструкции, неудобством управления пальцами и передачи информации от пальцев в устройство управления робота.

Захваты современных промышленных роботов снабжены пассивными пальцами. Однако хорошая конструкция захвата с пассивными пальцами обладает большей технологической гибкостью, чем это кажется, и позволяет работать с объектами различной формы. Прежде чем перейти к подобным конструкциям, рассмотрим несколько типов захватов рукой.

В имеющейся медицинской литературе [8] описано восемь основных типов захватов, но практическое значение для промышленности имеют только два: захват «тремя пальцами» (рис. 7.4) и «обхватывающий» захват, используемый при работе отверткой или молотком. В 90 % бытовых и производственных операций, не требующих больших усилий, используется захват тремя пальцами. Он применяется для захвата предметов разной величины (от горошины до теннисного мячика) и обеспечивается сокращением расположенной на обратной стороне ладони группы мышц (см. рис. 7.4). Однако он не такой прочный, как обхватывающий захват, при котором большую роль

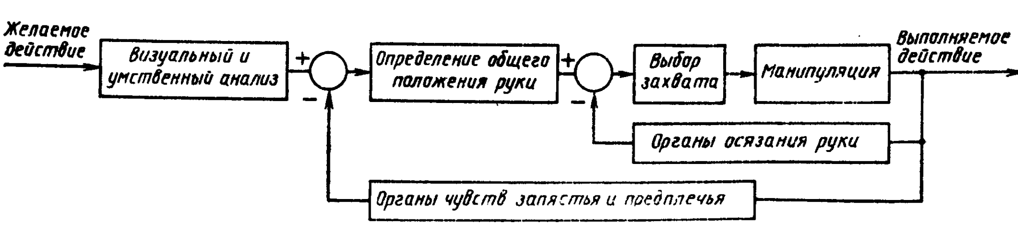


Рис. 7.3. Блок-схема действий, выполняемых в процессе захватывания, и обратные связи

играет трение между поверхностями всех пальцев и инструментом, а также используется сила всех пяти пальцев и очень сильной мышцы, связывающей мизинец с предплечьем через нижний край ладони.

7.3. Захваты промышленных роботов

Эти же принципы используются и в захватах промышленных роботов (рис. 7.5, 7.6). На рис. 7.5 изображен захват, состоящий из трех пальцев. Снизу находится очень широкий большой палец. Два верхних пальца занимают нужное положение по отношению к захватываемой детали с помощью шарнира. Они имеют столько же степеней подвижности, как на рис. 7.4. Эта конструкция (см. рис. 7.5) имеет некоторые признаки обхватывающего захвата, так как расстояние между указательным и средним пальцем увеличено (по сравнению с человеческой рукой), а образующий плоскость широкий большой палец напоминает способную подхватывать снизу ладонь. В результате захват получается более надежным. Такое сочетание двух основных типов захвата используется в конструкциях роботов для тяжелой промышленности. Недостатком такой конструкции является то, что в результате поворота пальцы смыкаются под некоторым углом, так что в закрытом состоянии захвата поверхности пальцев не параллельны.

На рис. 7.7 показан захват, в котором пальцы при движении навстречу друг другу не поворачиваются, так что захватывающие поверхности всегда параллельны. Эта конструкция в большей степени приспособлена для захвата плоских или прямоугольных предметов, чем захват с угловым движением пальцев (рис. 7.8). Механизм привода состоит из двух секторных шестерней, приводимых в движение либо зубчатой рейкой, связанной с цилиндром, либо червяком на оси электродвигателя. При такой конструкции усилие захвата ограничено максимальными размерами секторных шестерней и предельной нагрузкой на их зубья. Существуют и другие способы организации параллельного движения захватывающих поверхностей, например, изготовив пальцы в виде ходовых гаек, одетых на винтовой вал с правосторонней резьбой с одной стороны и левосторонней с другой. Приводы с электрическим сервомотором и ходовым винтом очень удобны для малогабаритных захватов, широко применяющихся на операциях сборки электронных устройств. Для тех же целей используются и миниатюрные пневмоцилиндры [9].

На рис. 7.9 представлен захват, который закрывается с помощью конусообразного кулачка. При выведении конуса из зазора пальцев последние разводятся пружиной.

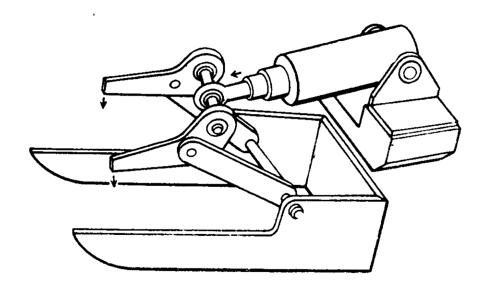


Рис. 7.5. Гибкий захват для турбинных лопаток

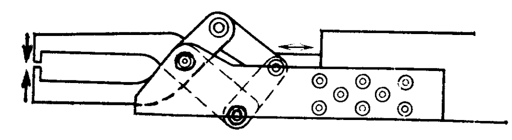


Рис. 7.6. Захват для поковок неправильной формы

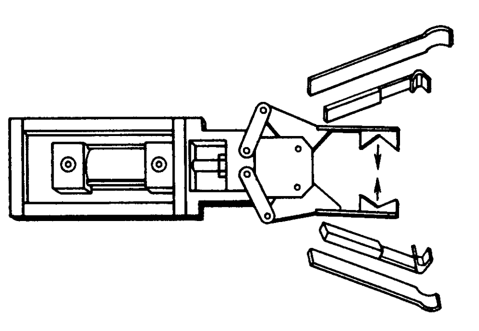


Рис. 7.7. Захват с двумя пальцами со сменным набором наконечников пальцев

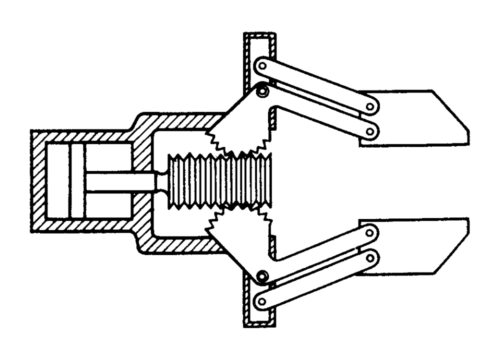


Рис. 7.8. Захват с параллельными захватывающими поверхностями и механизмом реечной передачи

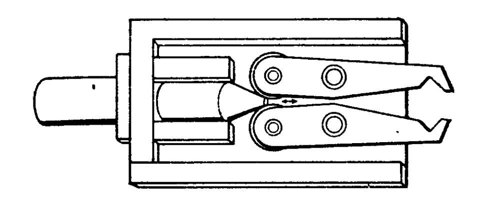


Рис. 7.9. Захват с двумя пальцами и большим усилием захвата

Захват не может широко раскрываться, но позволяет развить значительное усилие без применения мощных цилиндров или двигателей.

Для захвата труб, сосудов и других полых предметов часто используется внутренний захват. На рис. 7.10 изображена простая бесприводная конструкция. Захват состоит из гидравлического цилиндра, окруженного резиновой мембраной, и поршня. Захват вводится внутрь полости детали, и при его поднятии внутренний поршень вытягивается и жидкость поступает в мембрану. Мембрана растягивается, заполняя внутреннюю полость детали. Когда робот опускает деталь, поршень в цилиндре опускается вниз, жидкость откачивается из мембраны и деталь освобождается. Поршень удерживается в нижнем состоянии с помощью пружины. Захват можно модифицировать для внешнего обхватывания цилиндрических предметов.

Для захвата предметов сложной или неправильной формы требуются более гибкие конструкции. На рис. 7.5 изображен захват для турбинных лопаток. Лопасти имеют различные размеры и форму, но общим является то, что они изогнуты и сужаются от одного конца к другому. Как отмечалось выше, этот захват сочетает в себе свойства захватов, характерные для человека: тремя пальцами и обхватывающего. Приводимые в движение единым пневматическим приводом верхние пальцы затягивают лопасть на нижний палец до тех пор, пока ее край не упрется в фиксаторы. При этом лопасть

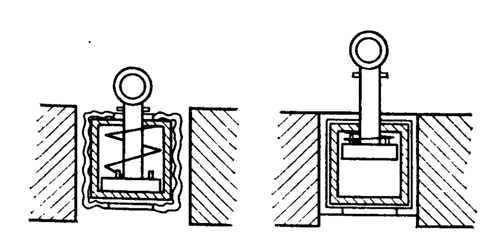


Рис. 7.10. Саморасширяющийся внутренний захват

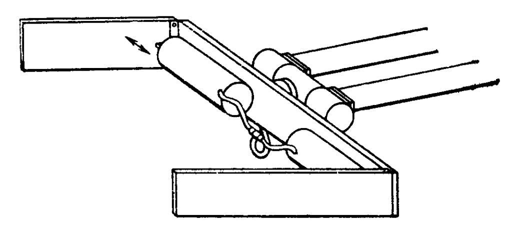


Рис. 7.11. Захват для ящиков и картонных упаковок

занимает в захвате правильное положение. Для индикации полного закрытия верхних пальцев и упора тыльной стороны лопасти в фиксаторы используются микровыключатели (см. разд. 7.6). Захват (см. рис. 7.6) используется в кузнечных цехах. Как и у захвата, изображенного на рис. 7.9, оба верхних пальца скреплены шарнирно. На примере этого захвата в разд. 7.5 рассматриваются свойства податливости и адаптивности.

На рис. 7.11 изображен простейший захват для переноски легких крупных объектов (например, картонных коробок). Захват закрывается при угловом смещении пальцев (как в конструкции, изображенной на рис. 7.7).

На рис. 7.12 показан захват для работы с хрупкими предметами. Он может использоваться также при переноске свежих фруктов. Два подвижных пальца изготовлены из эластичных материалов. Когда давление воздуха внутри их падает, пальцы изгибаются внутрь и плавно прижимают предмет к расположенному между ними упору [10]. Захват может удерживать предметы разных размеров и формы без проскальзы-

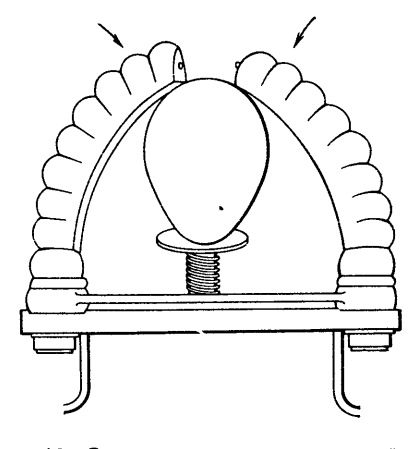


Рис. 7.12. Эластичный пневматический захват

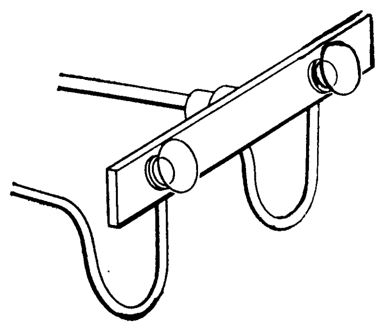


Рис. 7.13. Захват с вакуумными присосками

вания, так как материал, из которого изготовлены пальцы, имеет высокий коэффициент трения. Этот захват не очень мощный, но он податлив и корректирует мелкие погрешности позиционирования. Преимущества податливости рассматриваются ниже.

Большие плоские предметы обычно сложно захватить. Один из захватов, позволяющий это сделать, изображен на рис. 7.13. Для манипулирования листовым стеклом, металлом или большими легкими коробками используются вакуумные присоски. Поскольку вакуумные присоски обычно изготовляются из эластичных материалов, этот захват (так же как изображенный на рис. 7.12) является податливым. На эффективность работы захвата сильно влияет погрешность ориентации объектов, и поэтому он чаще всего используется для переноски деталей. Если требуется точная ориентация детали относительно захвата, то захват может быть снабжен направляющими, ориентирующими углы или грани поднимаемых объектов.

На рис. 7.14 изображена модификация вакуумного захвата. В таком виде он используется для переноски хрупких кремниевых пластин. Для получения сильного разрежения (с помощью которого захватывается и фиксируется пластина) используются сжатый воздух и эжектор. Часто такое решение оказывается проще и дешевле, чем применение вакуумного насоса. В другой модификации этого захвата для подъема пластины используется аэродинамическая сила, образуемая потоком воздуха, направленного к центру пластины и далее равномерно стекающего к ее краям. Под захватом монтируются направляющие для центровки пластины при подъеме.

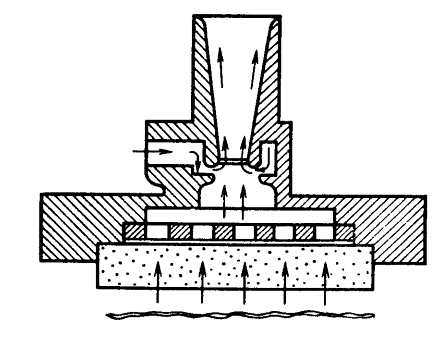


Рис. 7.14. Вакуумный захват для захватывания плоских поверхностей, построенный по принципу трубки Вентури

Для деталей, изготовленных из железа, можно использовать магнитные захваты. Они бывают самых различных размеров: от миниатюрных электромагнитов для переноски проволочных шпонок или гвоздей до гигантских электромагнитов — кранов на складах металлолома. Для того чтобы деталь была зафиксирована без проскальзывания, необходимо обеспечить хороший контакт между поверхностями магнита и детали. Для деталей с плоской поверхностью этого легко достигнуть, подвесив магнит податливой конструкции (см. разд. 7.5). Для неровных поверхностей используется прием, представленный на рис. 7.15. В этом случае к нижней стороне магнита крепится ящик или мембрана, заполненная металлическими опилками. Когда робот опускает электромагнит на деталь, частицы в ящике перераспределяются, повторяя рельеф поверхности, чем и обеспечивается хороший контакт. При подаче напряжения на электромагнит, частицы образуют твердую массу и обеспечивают жесткую фиксацию детали.

При работе с мягкими материалами (ткань, проволока, веревка) возникают специфические затруднения. Как правило, они плохо фиксированы, из мотка или стопки трудно выделить одну нить или заготовку кроя. На рис. 7.16 изображен уникальный захват для последовательной подачи деталей кроя из стопки. Сначала на стопку направляется струя воздуха. В результате этого верхний кусок материала начинает колебаться и слегка приподнимается над стопкой. Под него подводится тонкая

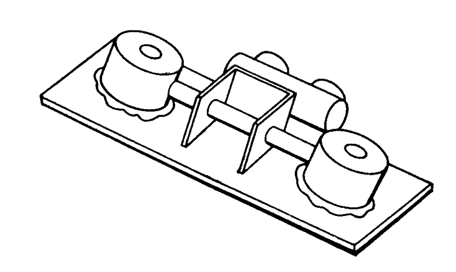


Рис. 7.15. Электромагнитный захват

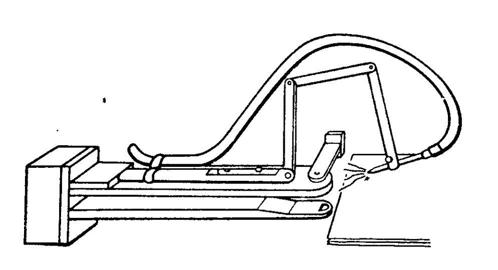


Рис. 7.16. Захват для материи

нижняя часть захвата. После этого захват закрывается. Для проверки толщины захваченного объекта (один или несколько слоев ткани) на нижней поверхности захвата установлен источник света, а на верхней — фотодатчик [11].

На манипуляторах, предназначенных для выполнения различных операций, могут использоваться сменные захваты или пальцы. На рис. 7.7 показан комплект сменных пальцев. При необходимости можно сменить и внутренний захват. Использование для соединения манипулятора с захватом байонетных замков, разработанных фирмой «Мак-Доннел — Дуглас», позволяет производить быструю смену захватов, что обеспечивает выполнение различных операций в течение одного производственного цикла [12]. Недостатком таких сменяемых захватов являются затраты на их обслуживание и комплектование, значительные затраты времени на смену захвата и сложность соединения силовых и сигнальных цепей робота с датчиками и приводами захвата.

Использование захватов с повышенной технологической гибкостью требует специальных приемов. Один из таких захватов изображен на рис. 7.17. Два из трех его пальцев приводятся в движение синхронно, одним двигателем. Кроме того, два пальца

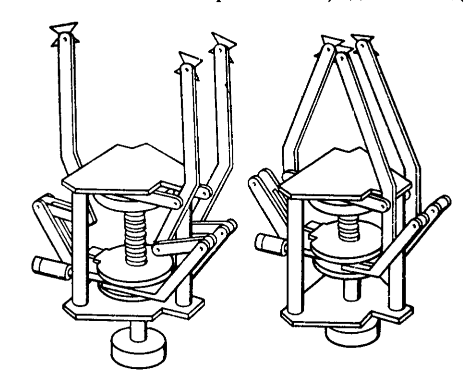


Рис. 7.17. Промышленный захват с тремя пальцами

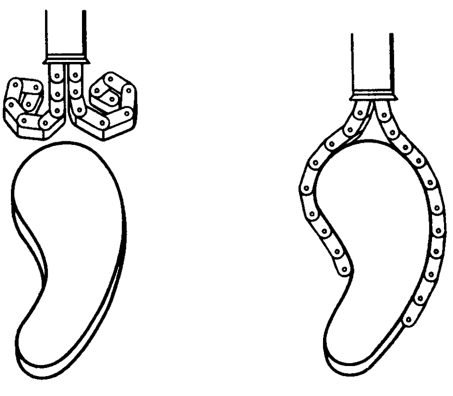


Рис. 7.18. Адаптивный захват

соединены через шарнир со вторым двигателем, что позволяет менять их ориентацию при захватывании. Для захвата длинномерных предметов два пальца могут быть развернуты параллельно друг другу и занять положение напротив третьего пальца. Для захвата небольших цилиндрических предметов два пальца разворачиваются так, чтобы закрытие всех пальцев осуществлялось по радиусам внутрь вплоть до соприкосновения в центре [13].

Еще один технологически гибкий захват представлен на рис. 7.18. Его пальцы легко обхватывают предмет, не оказывая на него большого давления [14, 15]. Он используется для захватывания хрупких предметов или предметов неправильной формы (так же, как захват, изображенный на рис. 7.12). Этот тип захвата был опробован при спасении людей в экстремальных ситуациях. Захват составлен из множества последовательно соединенных звеньев и похож на часть велосипедной цепи. Между соединениями в звеньях имеются шкивы, к которым прикреплены тонкие тросики. Если за них потянуть, то цепь звеньев меняет свою кривизну и обхватывает предмет. Давление при захвате равномерно распределяется по всей линии соприкосновения.

7.4. Анализ сил

В этом разделе обзор проблем классической механики не приводится, а рассматриваются лишь основные вопросы моделирования захватов. Более подробный статический анализ существующих захватов приведен в гл. 8, там же приводятся примеры и описывается удобная, систематизированная методика расчета нагрузок и сил приводов.

Привод оказывает на захваченный предмет или инструмент силовое воздействие через пальцы. Эти силы должны уравновешивать воздействия внешних сил и моментов, возникающих от воздействия сил тяжести, ускорений и столкновений с окружающими предметами. Приложенная к захваченному предмету внешняя сила обычно может быть представлена в виде шестимерного вектора с тремя поступательными и тремя вращательными компонентами. Для анализа пар составляющих сил можно воспользоваться графической диаграммой сил при условии, что будут учтены составляющие сил, действующие в перпендикулярном к чертежу направлении. Если требуется учесть упругие деформации захвата и пальцев, то следует использовать матричные методы (аналогичные используемым при расчете гибких и пространственных конструкций) [3, 5].

Расчет динамических нагрузок сложнее, чем расчет усилий захватывания и гравитационных составляющих. Чен [16] предложил использовать при учете динамических нагрузок запас прочности 1,2—2,0 (такой же запас прочности используется при проектировании любого движущегося промышленного оборудования). Максимальное ускорение, развиваемое роботом во время работы, достаточно велико и обычно составляет не менее 4,2 м/с^2, т. е. около половины величины ускорения свободного падения. Однако эти ускорения достаточно малы по сравнению с динамическими ускорениями, возникающими при касании роботом закрепленных конструкций (они могут превышать величину ускорения свободного падения примерно в четыре раза). Это заставляет вводить в конструкцию захвата элементы податливости (см. разд. 7.5).

После того как определены все действующие на деталь силы, можно определить требуемое усилие захвата. Оно зависит от коэффициента трения между поверхностями захвата и детали и от того, насколько эффективно фиксируется деталь. При захвате стальным захватом стальной детали величина коэффициента трения обычно не ниже 0,3. Для захвата с резиновыми пальцами коэффициент трения обычно не ниже 1,0, хотя он в значительной степени зависит от чистоты поверхности и наличия смазки [17, 18]. Если вычисленная сила захвата слишком велика для данной детали или для имеющихся приводов, то следует подобрать более упругий материал для пальцев захвата или использовать более подходящую конструкцию захвата, позволяющую увеличить захватываемую поверхность.

После того как определено усилие захвата, можно рассчитать для данной конструкции силы или моменты приводов. При этом можно воспользоваться методом балансировки сил для каждого сочленения, начиная

7.1. Величины сил захвата и привода для захватов, изображенных на рис. 7.7—7.9

Тип захвата	Отношение скоростей (V_a/V_f)[а]	Коэффициент трения (μ)[б]	Сила захвата $(2F)$[в], H	Усилие привода (P)[г], H	Диаметр пневматического цилиндра (D)[д], см
Захват со стальными пальцами (рис. 7.7)	3,0	0,3	333	111	2,0
Захват с обрезиненной поверхностью пальцев (рис. 7.7)	3,0	1,0	100	33	1,1
Захват со стальными пальцами (рис. 7.8)	0,3	0,3	333	1110	6,4
Захват с обрезиненной поверхностью пальцев (рис. 7.8)	0,3	1,0	100	333	3,5
Захват со стальными пальцами (рис. 7.9)	3,8	0,3	333	88	1,8
Захват с обрезиненной поверхностью пальцев (рис. 7.9)	3,8	1,0	100	26	1,0

а. Как отмечалось выше (см. разд. 7.4), отношение V_a/V_f представляет собой частное от деления скорости привода на скорость сближения концов пальцев. В таблице приведены типовые значения этого отношения для почти закрытого захвата. Величина этого отношения для захвата, изображенного на рис. 7.7, при неполном его закрытии (например, при захвате больших деталей) будет значительно меньше.

б. Коэффициент трения μ зависит от материала, из которого изготовлена рабочая поверхность захвата, и от чистоты и однородности этой поверхности. В таблице приведены типовые для касания стальных поверхностей и резиновой поверхности со стальной.

в. Величина силы захвата $2F$ рассчитана для небольшого металлического предмета, массой примерно 2,5 кг. Предмет захватывается высокоскоростным роботом, способным развивать ускорение до 9,8 м/с^2, т. е. примерно равное ускорению свободного падения. Максимальная величина ускорения для детали составляет $2g$, что соответствует силе в 50 Н. С учетом двукратного динамического запаса прочности получаем силу захвата $2\mu F \geqslant 100$ Н.

Продолжение табл. 7.1

г. Сила привода зависит от силы захвата и отношения скоростей $2F = P(V_a/V_F)$.

д. Диаметр пневматического цилиндра выбирается из расчета, что указанное усилие привода будет получено при величине давления воздуха не менее 35 Н/см².

от пальцев и двигаясь в направлении привода. Однако если структура захвата сложна, то проще воспользоваться другим методом и определить отношение скорости движения привода V_a к скорости перемещения оконечностей пальцев V_f. Это легко можно сделать, построив вручную или с помощью ЭВМ масштабный график зависимости перемещений оконечностей пальцев от малых смещений привода. Например, если сдвиг привода на 1 мм вызывает перемещение оконечностей пальцев на 2 мм, то это отношение скоростей равно 0,5. После чего силу привода P можно определить из уравнения для количества работы, выполняемой приводом и оконечностями пальцев:

$$V_aP = 2V_fF,$$

где P — сила привода, а F — сила захвата пальцев.

В табл. 7.1 приведены определенные по этому методу величины сил захвата и привода для захватов, изображенных на рис. 7.7—7.9. Для большинства захватов отношение скоростей зависит от степени закрытия захвата. И если захват используется при работе с предметами различного размера, то это отношение должно всякий раз определяться заново.

7.5. Гибкость и упругость

Под гибкостью захвата понимается его способность обеспечить плотный обхват поверхности объекта неправильной формы и способность захватывать объекты, неточно ориентированные относительно захвата. Преимущества гибких захватов особенно заметны при работе с деталями, расположенными в ячейках или на столе с некоторыми отклонениями от своих штатных мест, или при работе с грубо обработанными деталями (такими, как отливки или кузнечные заготовки).

Под упругостью понимается способность конструкции или некоторой структуры к упругой деформации под воздействием внешних сил или моментов. При снятии внешнего воздействия структура возвращается в положение равновесия. Надежность захватывания детали во многом определяется гибкостью захвата. На рис. 7.19 схематически изображена захваченная балка правильной формы, зафиксированная захватом в четырех точках. На нижней схеме балка деформирована и контакт с захватом обеспечивается лишь в трех точках. На схеме изображены действующие на деталь силы и моменты. При повороте захвата робота и балки значения приложенной силы F и момент M могут менять свой знак и абсолютную величину. В этих условиях при одном значении силы захвата фиксация балки в четырех точках более надежна, чем в трех. В конструкцию захвата (см. рис. 7.19) может быть включен качающийся или поворачивающийся в небольших пределах верхний зажим, обеспечивающий захват балки неправильной формы в четырех точках. Это один из возможных путей увеличения гибкости захвата.

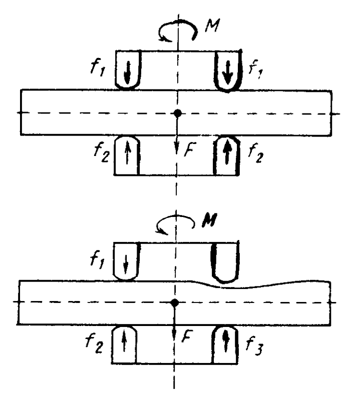


Рис. 7.19. Балка, зафиксированная захватом в трех и в четырех точках

На рис. 7.6 изображен гибкий захват, предназначенный для переноски необработанных поковок. При конструировании захвата принимались во внимание два фактора: высокая температура поковок (538 °С) и необходимость сохранения их ориентации. Как было отмечено выше (см. разд. 7.3), шаровой шарнир, связывающий верхние пальцы, позволяет им независимо занимать нужное положение относительно неровной или неправильной поверхности. Верхние и нижние пальцы приводятся в движение одним гидравлическим цилиндром, и вся конструкция, состоящая из гидравлического цилиндра и пальцев, может в небольших пределах качаться относительно рамы захвата. При сжатии пневматического цилиндра пальцы постоянно осуществляют захват поковки. Движение поршня продолжается до тех пор, пока деталь не будет крепко захвачена и пока не будет выбран свободный ход во всех соединениях. В этот момент срабатывает гидравлический тормоз, вся система захват — деталь становится жесткой, и этим обеспечивается сохранение ориентации детали.

Упругий захват позволяет адаптироваться к незначительным неровностям поверхности детали за счет собственной упругой деформации. Он также позволяет гасить перегрузки, возникающие при столкновении с направляющими или оснасткой.

Кроме того, упругий элемент может быть помещен между захватом и манипулятором робота. Запястья такой конструкции производятся промышленностью и называются устройствами пассивной податливости с удаленным центром (УПУЦ). Обычно в состав этой конструкции входят два металлических диска диаметром 50—150 мм, соединенные наклонными пружинами. Один из этих дисков крепится к манипулятору, а другой — к захвату, так что захват может отклоняться относительно манипулятора (см. кн. 2, гл. 52). Это способствует гашению слабых столкновений. При выполнении сборочных операций они могут возникнуть, например, при вставке шпилек в отверстия. Подбирая жесткость и угол пружин, можно сместить центр податливости к торцу шпильки и, таким образом, избежать перекоса (или заклинивания) шпильки при входе в отверстие. При этом возникающие в момент контакта силы позволяют правильно сориентировать шпильку и произвести точную сборку [19, 20].

Упругие захваты отличаются повышенной безопасностью. Упругая конструкция позволяет гасить контактные силовые взаимодействия. В отсутствие упругости ошибки в программировании, погрешности в действиях робота и в установке оснастки могут привести к аварии. В действительности, часто имеет смысл конструировать неупругие захваты, способные в момент столкновения отворачиваться или отдергиваться.

7.6. Датчики на захватах

На захватах промышленных роботов иногда устанавливаются датчики, которые можно поделить на три категории, различающиеся по стоимости и сложности.

К двоичным датчикам относятся микропереключатели, оптические и магнитные переключатели и биметаллические термопереключатели. Обычно это дешевые, простые в изготовлении и агрегатировании с устройствами управления датчики. Обычно они используются как индикаторы наличия или отсутствия детали, для поддержания значения некоторой величины (давления, температуры и т. п.) в определенных пределах и как концевые переключатели.

К аналоговым датчикам относятся термопары, линейно-дифференциальные преобразователи, тензометры и пьезоэлектрические датчики. Эти датчики дороже двоичных и обычно используются с измерительными приборами и аналого-цифровыми преобразователями. Как правило, они применяются для получения количественных характеристик.

К массивам датчиков и к датчикам, требующим дополнительной обработки сигнала, относятся расположенные на пальцах и ладони захвата массивы тактильных датчиков, массивы зрительных датчиков, пьезоэлектрические устройства с активным возбуждением. Датчики этого типа в большинстве случаев можно встретить лишь в научно-исследовательских лабораториях, однако промышленностью уже освоен выпуск электропроводной резины, меняющей сопротивление под давлением. Так как использование этих устройств связано с обработкой большого количества информации, то эти датчики обычно соединяются последовательными или параллельными каналами с ЭВМ (устройством управления роботом) через специальный микропроцессор.

7.7. Правила проектирования пассивных захватов

Можно сформулировать основные правила проектирования захвата. Они применимы к захватам современных промышленных роботов с пассивными пальцами. В следующем разделе перечислены правила проектирования для следующего поколения захватов промышленных роботов. При ознакомлении с основными типами захватов (см. рис. 7.5—7.18) следует иметь в виду эти правила. И впоследствии имеет смысл возвращаться к ним в процессе проектирования.

Правило 1. Изучите поставленное задание и объекты, связанные с ним. Постарайтесь представить процесс захватывания в наиболее абстрактной форме. Для этого необходимо проанализировать силовые взаимодействия (см. разд. 7.4). На этом этапе также можно решить вопрос о распределении контактных сил. Следует выяснить, являются ли захватываемые объекты бьющимися, упругими, скользкими или имеют неправильную форму. От этого зависят податливость и упругость захвата, а также особенности выполнения задания (см. разд. 7.5). Необходимо решить вопрос о типах используемых датчиков. Для большинства задач достаточно использовать простейшие датчики переключательного типа.

Правило 2. Определите дополнительные требования, не связанные непосредственно с процессом захватывания предметов. На этом этапе необходимо учесть температур-

ые режимы и степень загрязненности деалей. Может потребоваться автоматичекое отсоединение захвата от запястья роота. Кроме того, следует определить преельные нагрузки и ограничения рабочей оны захвата. На основании этих требова- й принимаются основные конструкторские ешения.

Например, может потребоваться выполить часть захвата из упругих материалов, азместить привод и захват с пальцами на екотором расстоянии или построить контрукцию таким образом, чтобы после толкновения захват отстегивался.

Правило 3. Выберите конкретные решения соответствии с правилами 1 и 2. На этом тапе требуется принять конкретные решеия по конкретной конструкции. При этом еобходимо рассмотреть несколько возможых вариантов построения датчиков, механической части и приводов. Модульный ринцип построения упрощает конструкцию, елает ее более гибкой и легко модернизиуемой, а также облегчает оценку достоинств и недостатков всех вариантов конструкции [21].

Например, задачу передачи энергии от даленных приводов можно решить с пофщью гибкого вала, зубчатой передачи, епной передачи, гидравлической системы ли карданной передачи. Аналогично, если о ходу выполнения задания требуется сиомоментное очувствление, можно использовать тензометры из фольги, пьезоэлектрические элементы и пьезосопротивления.

На рис. 7.5—7.18 изображено несколько риантов конструкций захватов. Другие имеры можно найти в книге Лундстрема, лемма и Рукса [22], в которой приведено ного чертежей нестандартных захватов омышленных роботов. Кроме того, решее может подсказать живая природа. Наиолее характерный пример — рука человека, , как отмечалось выше, она чрезмерно ожна для выполнения большинства проышленных операций. Проще устроены птий клюв, пасть собаки, клешни рака, хот слона и щупальца осьминога.

Правило 4. На основе принятых решений риступайте к разработке конструкции по дульному принципу. Попробуйте поэксриментировать с различными вариантами, ределенными на предыдущем этапе. Кро- е того, требуется ответить на традиционе вопросы: является ли конструкция обной, прочной, экономичной? Можно ли еньшить количество подвижных элемен- в?

Правило 5. Рассмотрите возможность ановки на конце манипулятора двух и трех захватов. Такое решение освобоает от необходимости разрабатывать иверсальный захват для выполнения всех операций. Кроме того, повышается производительность робота, так как уменьшается количество перемещений манипулятора, например, если робот подносит с помощью одного захвата необработанную деталь на отделочную ячейку, устанавливает необработанную деталь на место с помощью первого захвата и возвращается назад с готовой деталью.

Правило 6. Проверьте возможность замены детали и задания. На этом этапе требуется определить, в какой степени можно добиться упрощения конструкции захвата и повысить эффективность использования робота за счет изменений детали или задания. Как отмечалось выше, захват представляет собой связующее звено между роботом и другим технологическим оборудованием. Следовательно, конструкция захвата должна быть связана с конструкцией оборудования и деталей, с которыми робот вступает во взаимодействие. Таким образом, конструирование захвата является частью общего процесса проектирования роботизированной системы. Например, при работе робота с отливками, целесообразно для упрощения их ориентирования относительно захвата снабжать отливки зацепками или какими-либо отличительными признаками. Позднее при окончательной обработке эти лишние элементы могут быть удалены. Другой пример — использование фасок и зенковок на соприкасающихся поверхностях деталей при сборке [23].

7.8. Правила проектирования активных захватов и запястий

Пассивные захваты промышленных роботов (см. рис. 7.5—7.18) не имеют органов очувствления и не способны активно адаптироваться (что характерно для человеческой руки при выполнении повседневных операций). Пассивный захват может только открываться или только закрываться, а все остальные действия выполняются манипулятором робота. Пассивный захват может быть представлен в качестве элемента разомкнутой системы управления. Совершенствование систем управления роботами датчиков дает возможность использовать обратные связи, т. е. представить захват в качестве элемента замкнутой цепи (см. рис. 7.3). Ниже рассматриваются достоинства систем с активными пальцами и запястьями.

Ранее (см. разд. 7.5) были рассмотрены принципы построения пассивных упругих захватов. Их запястья могут быть приспособлены для измерения величины и направления действующих на деталь сил при столкновениях и отклонениях в процессе

сборки. Существует много способов получения количественной информации с помощью аналоговых датчиков (см. разд. 7.6). Кроме того, информацию, полученную с датчиков, можно использовать для управления и корректировки действий запястья, и с этой точки зрения можно рассматривать запястье как активный элемент. Существует много прикладных заданий, в которых для управления запястьем требуется измерение сил и отклонений. Например, при обрезке можно использовать величину отклонения режущего инструмента от манипулятора для сглаживания линии отреза. Обрезка, как и фрезеровка торцов, используется для изготовления плоских пластин заданного размера.

В будущем можно будет создать промышленный робот с очувствленными пальцами. Разработанный коллективом под руководством Хаквуда [24] датчик в виде кожного покрытия может регистрировать нормальные и касательные силовые взаимодействия и, кроме того, может собирать информацию для управления активными пальцами. Ранее отмечалось (см. разд. 7.2), что основные законы управления активными пальцами и модели захватов, которые могут использоваться с датчиками типа «искусственная кожа» уже сформулированы.

С точки зрения промышленного конструирования следует подчеркнуть, что современными промышленными манипуляторами с активными запястьями и пассивными пальцами можно выполнить много технологических операций. В тяжелой промышленности захват с активным запястьем и пассивными пальцами даже лучше приспособлен для выполнения операций, чем захват с активными пальцами. Это объясняется двумя соображениями. Во-первых, существуют зависимости (рис. 7.20), связывающие возможности робота и его сложность. Из графика видно, что совершенствование захвата

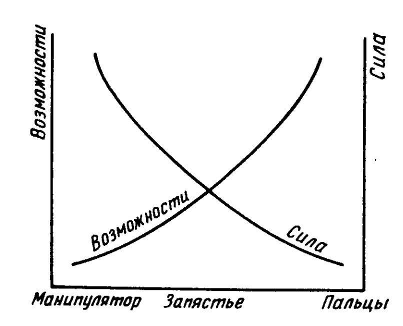


Рис. 7.20. Соотношения при выполнении манипуляций манипулятором, запястьем и пальцами

с пассивными пальцами идет по пути комплектации его пассивным запястьем, затем активным запястьем, а затем и активными пальцами. Однако платой за такое улучшение является потеря мощности, выражающаяся через усилие захвата или силовые взаимодействия инструмента с объектом. Во-вторых, даже человек при обхватывающем захвате молотка или тяжелого гаечного ключа не пользуется пальцами активно. Когда человеку необходимо развить большое усилие, он сжимает пальцы в пассивный прочный захват и использует силу мускулов запястья и руки. С появлением нового поколения очувствленных роботов конструктор может успешно использовать для выполнения подобных операций обхватывающий захват с активным запястьем. Перечисленные идеи сформулируем в виде правил проектирования.

Правило 7. «Тяжелые» производственные операции, выполняемые человеком с помощью обхватывающего захвата инструмента, следует механизировать с помощью очувствленных роботов в первую очередь, так как они хорошо выполняются с помощью захвата, состоящего из активного запястья и пассивных пальцев. Между операциями, выполняемыми с помощью тяжелого ручного инструмента, и более тонкими операциями, которые лучше всего выполнить с помощью захвата из трех активных пальцев (см. рис. 7.4), существует принципиальное различие. В качестве примера можно привести процесс сборки электронных компонент с помощью маленькой отвертки и пинцета. Тем не менее следующее правило непосредственно связано с правилом 7.

Правило 8. Если в производственной операции требуется развивать усилие или момент, превышающий 9—22 Н, то использование обхватывающего захвата инструмента и активного запястья с пассивными пальцами предпочтительней, чем захвата с тремя активными пальцами. Величина 9—22 Н была получена в результате экспериментов по измерению усилия, развиваемого при выполнении операций, когда захват с тремя пальцами начинал проскальзывать и приходилось использовать обхватывающий захват. Зная эту величину, конструктор может определить максимальную величину сил взаимодействия, возникающих при выполнении конкретного задания, и воспользоваться следующим правилом.

Правило 9. Производственные операции различаются по степени участия в них манипулятора, запястья и пальцев, и выбор конкретной технологии должен учитывать специфику производства.

В настоящее время на производстве наиболее широко распространены описанные в этой главе захваты с пассивными пальцами.

Тем не менее последние три правила конструирования упомянуты в этой главе, чтобы подчеркнуть тенденцию использования активных захватов в промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Asada, H., Studies on Prehension and Handling by Robot Hands with Elastic Fingers, Ph. D. thesis, Kyoto University, April 1979.
2. Hanafusa, H. and Asada, H., Stable Prehension by a Robot Hand with Elastic Fingers, *Seventh International Symposium on Industrial Robots*, Tokyo, Japan, October 1977, pp. 361—368.
3. Cutkosky, M. R., A Cybernetic Approach to Grasping and Prehension for Automated Manufacturing, Ph. D. thesis, Carnegie-Mellon University, 1984 (expected).
4. Salisbury, J. K., Kinematic and Force Analysis of Articulated Hands, Ph. D. thesis, Stanford University, July 1982.
5. Salisbury, J. K. and Craig, J. J., Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues, *Robotics Research*, Vol. 1, No. 1, 1982, pp. 4—17.
6. Okada, T. and Tsuchiya, S., On a Versatile Finger System, *Seventh International Symposium on Industrial Robots*, October 1977, pp. 345—352.
7. Okada, T., Computer Control of Multijointed Finger System for Precise Handling, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-12, No. 3, May 1982, pp. 289—299.
8. Tubiana, R., *The Hand*, W. B. Saunders Co., Philadelphia, 1981.
9. Sanderson, A. C. and Perry, G., Sensor-Based Robotic Assembly Systems: Research and Applications in Electronic Manufacturing, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 71, No. 7, July 1983, pp. 856—871.
10. Inside Japan, *Assembly Automation (GB)*, February 1982, pp. 58.
11. Taylor, P. et al., The Application of Robots in the Garment Manufacturing Industry, *Robotics Initiative, 2nd Annual Grantees Conference*, SRC, London, September 1983, pp. 37G.
12. Eastwood, M. A. and Ennis, G. E., ICAM Robotic System for Aerospace Batch Manufacturing, Fourth Quarterly Interim Technical Report IR-812-8 (IV), McDonnell Douglas Corp., August 1979, U. S. Air Force Contract F33615-78-C-5189, Project 812-8, Task B.
13. Skinner, F., Designing a Multiple Prehension Manipulator, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 97, No. 9, September 1975, pp. 30—37.
14. Hirose, S. and Umetani, Y., The Development of Soft Gripper for the Versatile Robot Hand, *Proceedings, Seventh International Symposium on Industrial Robots*, 1977, pp. 353—360.
15. Hirose, S. and Umetani, Y., The Development of Soft Gripper for the Versatile Robot Hand, *Mechanism and Machine Theory (GB)*, 1978, pp. 351—358.
16. Chen, F. Y., Force Analysis and Design Considerations of Grippers, *Industrial Robot (UK)*, Vol. 9, No. 4, December 1982, pp. 243—249.
17. Bowden, F. P. and Tabor, D., *The Friction and Lubrication of Solids*, Oxford University Press, London, 1950.
18. Fuller, D. D., Friction, in Baumeister, T., Ed., *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*, McGraw-Hill, New York, 1978, pp. 25—32.
19. Whitney, D. E. et al., Part Mating Theory for Compliant Parts, First Report, The Charles Stark Draper Laboratory Inc., August 1980, NSF Grant No. DAR79-10341.
20. Cutkosky, M. R. and Wright, P. K., Position Sensing Wrists for Industrial Manipulators, *Proceedings, Twelfth International Symposium on Industrial Robots*, Paris, France, June 1982, pp. 427—438.
21. Rinderle, J. R., Measures of Functional Coupling in Design, Ph. D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, June 1982.
22. Lundstrom, G., Glemme, B., and Rooks, B. W., *Industrial Robots — Gripper Review*, International Fluidics Services Ltd., 35—39 High Street, Kempston, Bedford, England, 1977.
23. Whitney, D. E., Gustavson, R. E., and Hennessey, M. P., Designing Chamfers, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 2, No. 4, 1983, pp. 3—18.
24. Hackwood, S. et al., A Torque Sensitive Array for Robotics, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 2, No. 2, 1983, pp. 46—50.
25. Sheldon, O. L. et al., Robots and Remote Handling Methods for Radioactive Materials, *Second International Symposium on Industrial Robots*, Chicago, May 1972, pp. 235—256.

26. Warnecke, H. J. and Schmidt, I. I., Flexible Grippers For Handling Systems — Design Possibilities and Experiences, *Fifth I. C. P. R.*, Chicago, August 1979, pp. 320—324.
27. Robots, an American Breed by A. T. I., Air Technical Industries, Mentor, Ohio, Catalog No. R-21-C.

Глава 8 УСТРОЙСТВО АНТРОПОМОРФНЫХ ЗАХВАТОВ

К. Танэ, министерство международной торговли и промышленности г. Ибараки, Япония

8.1. Введение

Обычно захваты промышленных роботов используются для выполнения конкретных задач. Они предназначены для манипулирования объектами, на форму и размеры которых накладываются определенные ограничения. Функциональные возможности захвата четко определены. Захваты такого типа имеют несложное устройство и сравнительно дешевы в изготовлении, но оснащение ими манипулятора робота резко ограничивает его технологическую гибкость. В некоторых случаях такое ограничение технологической гибкости оправдано. Но в большинстве случаев захват должен работать с объектами, существенно различающимися по весу, форме и материалу. В таких случаях целесообразно использовать универсальные антропоморфные захваты (иногда их называют кистями робота).

В настоящее время разработка универсальных захватов и приемов их использования еще далека от завершения. Промышленных образцов антропоморфных захватов не существует. Поэтому ниже рассматриваются некоторые аспекты проектирования специализированных захватов, дополняющие материал гл. 7. Для антропоморфных захватов описываются лишь отдельные особенности устройства. В конце главы приводится обзор современных разработок в этой области.

8.2. Функции захватов

Согласно Шлесинжеру [1], существует шесть основных вариантов захватывания предметов человеческой рукой: щепотью, боковой, цилиндрический, сферический, щипковый и зацепляющий (рис. 8.1). Кросли классифицировал манипуляции руки, разделив их на девять типов: нажатие курка, щелканье переключателем, захватывание в кулак, работа ножницами, завинчивание авторучки, вращение сигареты, перенос авторучки, печать на машинке и письмо авторучкой [2].

Существует несколько параметров, определяющих эти типы действий. Главными являются количество пальцев, количество суставов в каждом пальце и количество степеней подвижности кисти руки.

Кисть человека имеет пять пальцев: большой, указательный, средний, безымянный и мизинец. Как механизм человеческая рука имеет 27 степеней подвижности, 20 из которых относятся к кисти [3]. Каждый из пальцев, за исключением большого, имеет три сустава и каждый может двигаться с четырьмя степенями подвижности. Большой палец имеет два сустава и три степени подвижности. У ладони имеется одна степень подвижности. Чтобы смоделировать все захваты и манипуляции, выполняемые человеческой рукой, необходимо рассмотреть связь между структурой захватывающего устройства и его функции.

Для выполнения простейшей функции захватывания захват должен иметь два паль-

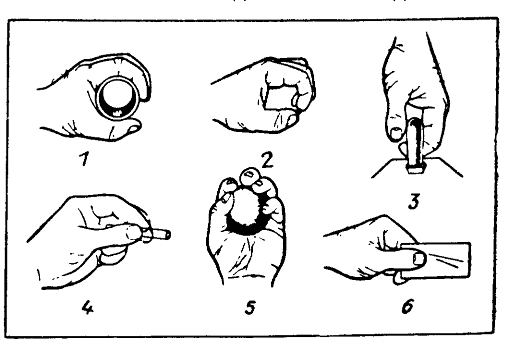


Рис. 8.1. Различные типы захвата человеческой рукой:
1 — цилиндрический; *2* — щипковый; *3* — зацепляющий; *4* — щепотью; *5* — сферический; *6* — боковой

8.1. Приблизительные зависимости между числом пальцев и сочленений в захвате и функциями, которые могут ими выполняться

Тип пальцев в захвате		Функции		
Число	Жесткость	Захват	Соответствие поверхности	Манипуляции
2	Жесткие	0	×	×
2	Гибкие	0	0	×
3	Жесткие	0	0	×
3	Гибкие	0	0	0
5	Жесткие	0	0	×
5	Гибкие	0	0	0

Примечание. 0 — некоторые захваты выполняют функцию; × — функция захватами не выполняется.

ца, соединенных шарниром с одной степенью подвижности, позволяющим осуществлять их закрытие и открытие. Если захват имеет два жестких пальца, то он может захватывать ограниченный класс объектов с мало отличающейся формой. Кроме того, такое устройство не может осуществлять сложных манипуляций, поскольку все степени подвижности используются для захватывания.

Существует два способа повысить адаптивность захвата к форме объекта. Во-первых, можно ввести сочленения в пальцы захвата. Во-вторых, можно увеличить количество пальцев захвата (не больше пяти). С усложнением захвата появляется возможность осуществлять манипуляции захваченным объектом (как правило, для этого необходимо больше пальцев и степеней подвижности, чем для захватывания).

Чем больше пальцев, сочленений и степеней подвижности имеет захват, тем выше его универсальность. В табл. 8.1 указана приблизительная связь между количеством пальцев и сочленений в захвате и операциями, которые могут им выполняться.

8.3. Классификация захватов

Как уже отмечалось выше, захваты различаются количеством пальцев, сочленений и степеней подвижности. Любой комбинации этих трех параметров соответствуют различные свойства захвата. Кроме того, в захватах используются различные приводы. Ниже приводится классификация захватных устройств по функциональному признаку. Системы приводов рассматриваются в следующем разделе.

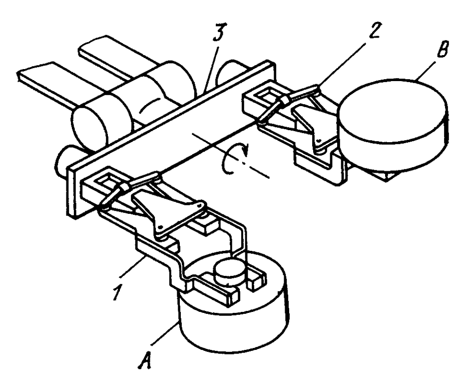


Рис. 8.2. Запястье с несколькими захватами (*1—3, A, B*)

По функциональным возможностям захваты можно разделить на три категории: многоцелевые, специальные и универсальные.

Первая категория включает в себя пальцевые захваты, предназначенные для выполнения ограниченного множества операций. Они обладают меньшей технологической гибкостью и имеют меньше пальцев и сочленений. Правда, стоят они намного дешевле.

Эта категория поддается дальнейшей классификации, например, по количеству пальцев: выделяются двух-, трех- и пятипальцевые устройства. В промышленности наибольшее распространение получили двухпальцевые захваты. Трех- и пятипальцевые захваты используются главным образом в протезировании.

Другой вариант дальнейшей классификации основан на количестве захватов, устанавливаемых на запястье манипулятора. Многозахватный рабочий орган (рис. 8.2) позволяет одновременно выполнить несколько операций. Однако методы проектирования каждого из захватов такого органа не отличаются от методов проектирования одиночного захвата.

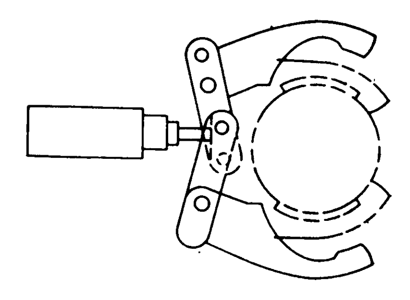


Рис. 8.3. Внешний захват

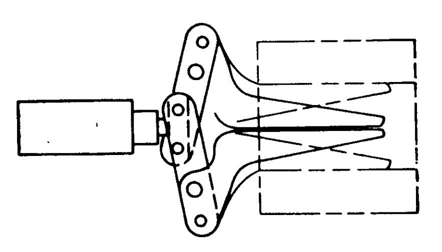


Рис. 8.4. Внутренний захват

Возможна классификация по способу захватывания объекта: снаружи или изнутри. Внешний захват (рис. 8.3) используется для захватывания наружных поверхностей объекта сжимающимися пальцами. Внутренний захват удерживает объект за его внутренние поверхности, разжимая пальцы (рис. 8.4). По движению пальцев выделяются захваты с поступательным и вращательным движением пальцев. Захваты первого типа сохраняют параллельность пальцев относительно друг друга. В захватах второго типа пальцы перемещаются по примеру ножниц.

Еще один вариант классификации основан на учете количества степеней подвижности захвата. Подавляющее большинство механических захватов имеют одну степень подвижности. Захваты, имеющие более двух степеней подвижности, встречаются крайне редко.

Вторая категория включает в себя специальные захватные устройства. Типичные представители этой категории — вакуумные присоски и электромагниты. В некоторых заданиях приходится манипулировать с объектами большого объема или, наоборот, тонкими для пальцев захвата. В таких случаях эффективнее специальные захваты.

К третьей категории относятся универсальные захваты, как правило, имеющие более трех пальцев и (или) более одного сочленения в каждом пальце. Они позволяют выполнять большую номенклатуру операций захватывания и перебазирования объектов. Почти все такие устройства экспериментальные. Поэтому далее рассматриваются захваты, относящиеся в основном к первой категории.

8.4. Приводы захватов

В большинстве роботов используется три основных типа приводов: электромеханический, пневматический и гидравлический. Наиболее распространены захваты с пневматическим приводом. Основными компонентами пневматического привода являются цилиндр и мотор. Управление направлением движения рабочего тела осуществляется с помощью двухпозиционных вентилей, управляемых соленоидами. Для управления скоростью движения привода служат вентили регулировки воздушного потока. Для питания системы сжатым воздухом используются компрессоры с максимальным рабочим давлением 10 кг/см^2.

Пневматические приводы самые дешевые, и это является основной причиной их широкого применения в промышленных роботах. Кроме того, для пневматического привода характерна малая жесткость. Это позволяет выполнять мягкое захватывание, не повреждая поверхности захваченного объекта. С другой стороны, малая жесткость привода делает невозможным точное позиционирование. Для позиционного управления пневмоприводом можно использовать пневмоаппараты, но они не получили широкого распространения.

Электромеханические приводы также широко используются в промышленных роботах. Существует два основных типа приводных электродвигателей: двигатель постоянного тока и шаговый электродвигатель. Как правило, электродвигатель соединяется с редуктором, обеспечивающим необходимые усилия или крутящий момент. Хотя в настоящее время на рынке появились тихоходные электродвигатели, не требующие применения редуктора, они слишком дороги, чтобы использовать их в серийных промышленных роботах. Примеров использования тихоходных электродвигателей в конструкциях захватов мало. В состав электромеханического привода входят также сервоусилители мощности. Электромеханический привод очень удобен для установки в сочленениях. Во-первых, существует много серийно выпускаемых устройств. Во-вторых, электромеханическая природа управляющих сигналов сильно упрощает процесс построения гибких систем управления и позволяет использовать в качестве устройства управления ЭВМ. В-третьих, электромеханический привод (особенно с электродвигателем постоянного тока) может работать в системах как силового, так и позиционного управления. Тем не менее у электромеханических систем имеются и недостатки: они дороже пневматических приводов; переходные характеристики хуже, чем у пневматических и гидравлических приводов; их жесткость ниже, чем у гидравлических систем; их нельзя применять во взрывоопасных средах из-за искрения и тепловыделения.

Термин «гидравлический привод» означает использование в качестве привода электрогидравлической системы. Хотя устройство такого привода аналогично устрой-

тву пневматического привода, их техничеkие характеристики отличаются. Обычно идравлический привод состоит из силовых сполнительных механизмов, управляющих идроаппаратов и силовых агрегатов. Существует три типа исполнительных механизмов: цилиндр с поршнем, поршневой мотор и гидравлический мотор. Для обеспечения позиционного управления с помощью электрических сигналов необходимы соответствующие преобразователи. К ним относятся электромашинные вентили и гидроаппараты с электрическим управлением. Первые предназначены для включения или выключения подачи давления рабочего тела, которые используются в системах пропорционального позиционного управления. Гидравлический привод позволяет добиваться высокой точности позиционирования при любых нагрузках благодаря высокой жесткости системы. С другой стороны это осложняет силовое управление, так как высокая жесткость системы повышает величину коэффициента усиления давления, что, в свою очередь, ведет к неустойчивости системы управления. Другим преимуществом гидравлических приводов является высокая величина отношения мощности к весу. Все это делает гидравлические приводы незаменимыми при разработке мощных компактных роботов.

Кроме трех рассмотренных типов приводов существуют и другие. Например, в некоторых захватах используются пружины или другие упругие элементы. Пружины часто используются для раздвигания пальцев захватов с пневматическим или гидравлическим приводом. На рис. 8.5 изображен пружинно-рычажный захват с пневмоцилиндром [5]. Захватывание выполняется с помощью пневмоцилиндра, а при отпускании пальцы разводятся пружиной. Такой способ построения захвата сильно упрощает пневматические или гидравлические схемы и системы управления ими.

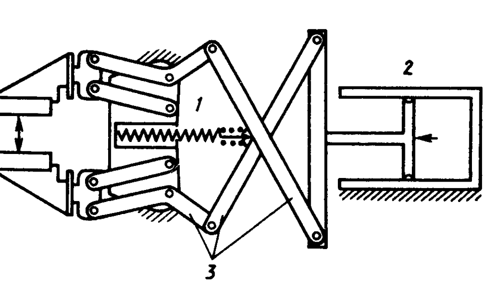
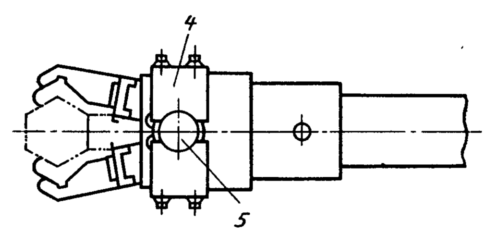


Рис. 8.5. Пружинно-рычажной захват:
1 — возвратная пружина; 2 — цилиндр; 3 — рычажной привод

Пружины могут использоваться и для захватывания. В этом случае очевидно, что усилие захватывания пропорционально жесткости пружины. Следовательно, для получения большого усилия захвата требуется использование жестких пружин. В этом случае приходится увеличивать мощность привода, разводящего пальцы захвата. Из-за этого применение пружин для захватывания ограничивается рабочими органами для работы с небольшими объектами — шпильками, гайками и болтами.

Пружины часто используются совместно с пневмо- и гидроприводами, поскольку при снятии давления рабочего тела пружина, связанная с поршнем, легко возвращает его в исходное положение. С другой стороны, комбинация пружины и электродвигателя неэффективна, поскольку двигатели используются только совместно с редукторами, затрудняющими разворот оси электродвигателя в исходное положение.

Иногда в захватах используются электромагниты. Электромагнитный привод состоит из магнитной головки, имеющей ферромагнитный каркас, электроприводящей катушки и штока, изготовленного из магнитного материала. Когда на катушку подается напряжение, магнитная головка втягивает в себя шток и положение привода строго фиксируется. Если же в катушке тока нет, то шток свободно перемещается вдоль своей оси. В таком приводе обычно имеется возвратная пружина, обеспечивающая фиксацию двух положений штока. На рис. 8.6 изображен захват с электромагнитным приводом. Шток электромагнитного привода 1 перемещается влево вдоль оси $L - L$. Это



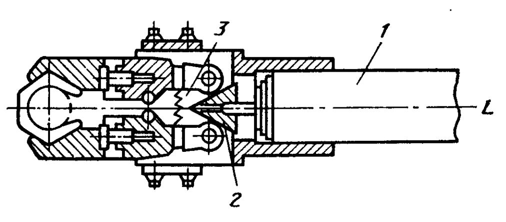


Рис. 8.6. Захват с электромагнитным приводом:
1 — шток; 2 — кулачок; 3 — пружина; 4 — защитная поверхность; 5 — стержень с прокладками

поступательное движение преобразуется в сжатие пальцев кулачком 2. Раскрытие захвата выполняется пружиной 3.

Как правило, величина смещения штока невелика, потому что с ее увеличением сила притяжения магнитной головки уменьшается. Поэтому такой тип привода используется только при работе с небольшими объектами.

Выбор привода оказывает существенное влияние на эффективность захвата. Как правило, выбор привода осуществляется в зависимости от специфики выполняемых рабочим органом операций. Если в захвате имеются позиционно управляемые сочленения, то лучше воспользоваться электромеханическим или гидравлическим приводом. Во всех остальных случаях предпочтительнее пневматический привод. Если захват должен работать во взрывоопасной среде (например, на манипуляторе робота системы аэрозольной окраски), следует использовать пневматический или гидравлический привод. Если необходимо управлять усилием, развиваемым в сочленении или при захватывании, то целесообразно использовать электромеханический или пневматический привод.

8.5. Механические захваты

Упомянутые выше функции захватов (см. разд. 8.3) могут быть реализованы различным образом. Проанализировав кинематические пары, используемые в захватах, Чен [6] выделил следующие типы: кулисные механизмы, кремальеры, кулачки, винты, тросы, шкивы и т. д. Выбор конкретного механизма зависит от типа привода и от способа захватывания объекта. Существует много типов захватов, но на практике применяются далеко не все. Ниже описывается несколько конструкций (в работе [6] приведено намного больше примеров).

8.5.1. Механический захват с двумя пальцами

Захваты с угловым перемещением пальцев. Этот тип промышленного захвата наиболее часто используется в промышленных роботах. Он применяется для захвата ограниченного числа граней объекта и особенно удобен для захватывания объектов цилиндрической формы. На рис. 8.7 изображена схема захвата. Его конструкция в значительной степени зависит от типа привода. Привод, производящий линейное перемещение (пневматический или гидравлический цилиндр и поршень), обычно связывается

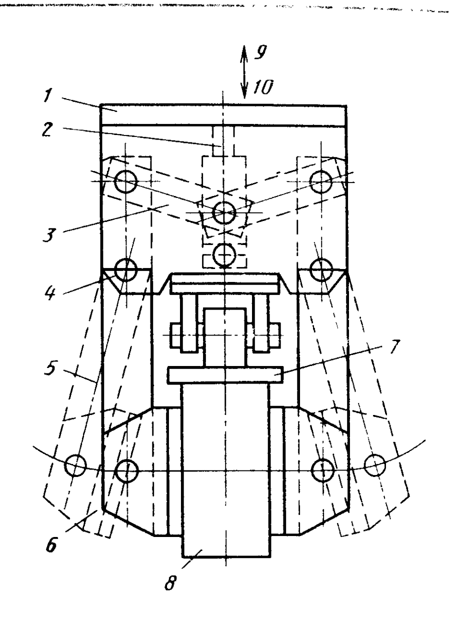


Рис. 8.7. Захват с угловым перемещением пальцев:
1 — основание пальцев; 2 — стержень привода; 3 — сочленение; 4 — штифт; 5 — рычаг; 6 — шарнир; 7 — упор; 8 — объект; 9 — направление захватывания; 10 — направление открытия захвата

с парным кривошипно-ползунным механизмом.

На рис. 8.8 показана схема одного из вариантов построения парного кривошипно-ползунного механизма. Когда поршень 1 под давлением рабочего тела смещается вправо, то звенья механизма 2 и 3 поворачиваются соответственно против часовой стрелки относительно центра шарнира $A1$ и по часовой стрелке относительно центра шарнира $A2$ (если угол γ меньше $180°$). В результате этого вращательного движения свободные концы звеньев 2 и 3 сближаются. Раскрытие захвата производится смещением поршня влево. При значении угла $\gamma = 180°$ механизм имеет мертвую точку. Для нормальной работы захвата

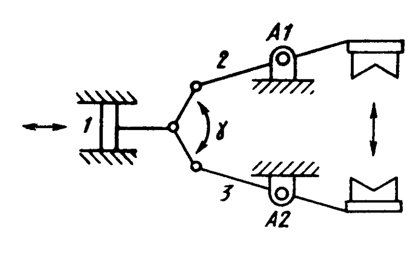


Рис. 8.8. Схема парного кривошипно-ползунного механизма

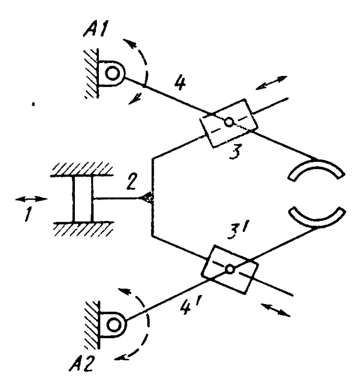


Рис. 8.9. Схема кулисного механизма

угол γ не должен принимать значение 180°. Обычно угол γ принимает значения в пределах от 160 до 170°.

На рис. 8.9 изображен другой вариант построения шарнирного захвата, в состав которого входят цилиндр с поршнем и кулисный механизм. Связанный с поршнем рычаг *1* в свою очередь приводит в движение симметричные механизмы *1—2—3—4* и *1—2—3′—4′*, что приводит к раскрытию или закрытию захвата звеньями *4* и *4′*, вращающимися относительно осей *A1* и *A2*.

На рис. 8.10 изображен вариант построения захвата с вращающимся приводом, установленным в точке соединения двух пальцев. Один палец соединен с валом, а другой — с корпусом привода. Вращение привода передается на пальцы, вызывая раскрытие или закрытие захвата. Кинематическая пара вращения, используемая в этом захвате, схематически представлена на рис. 8.11, *а*. В составе такого захвата могут использоваться и другие приводы. На схеме (рис. 8.11, *б*) вместо вращающегося привода используется цилиндр с поршнем. На следующей схеме (рис. 8.11, *в*) для пре-

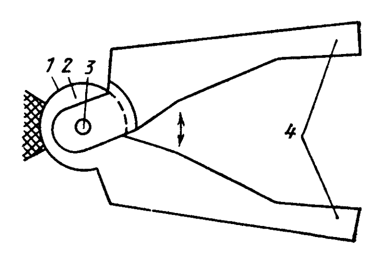


Рис. 8.10. Захват с вращающимся приводом:

1 — вращающийся привод; *2* — корпус; *3* — вал; *4* — пальцы

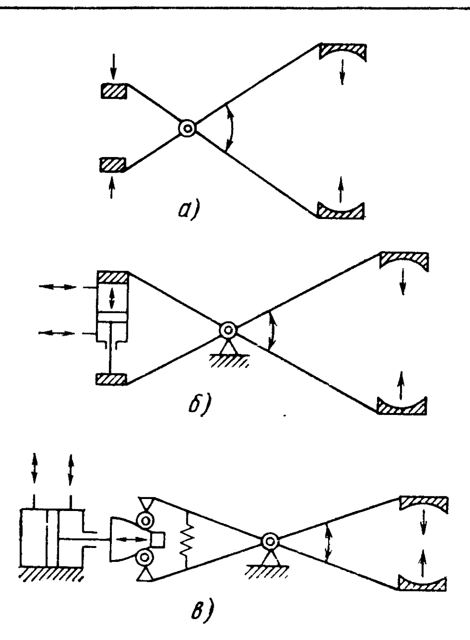
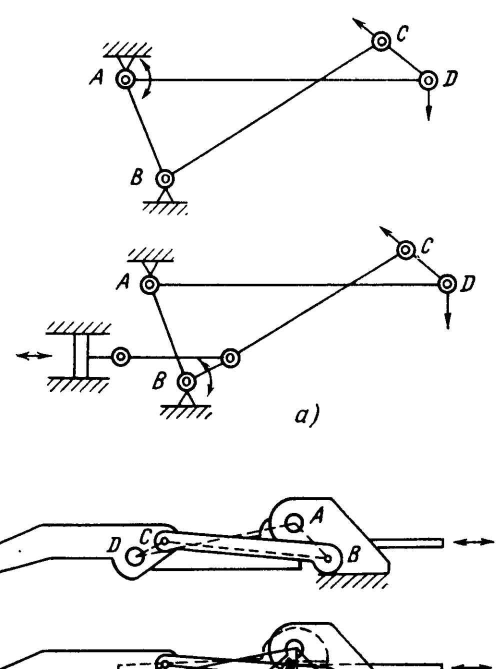


Рис. 8.11. Схема кинематической пары вращения (*а*), захват с использованием кинематической пары вращения и цилиндра с поршнем (*б*), захват с использованием цилиндра с поршнем и кулачка (*в*)

образования поступательного движения привода во вращательное движение захвата используется кулачок.

На рис. 8.12 изображен четырехзвенный механизм с двумя шарнирами, закрепленными в точках *A* и *B*. Такая схема иногда используется для наклона пальца. На рис. 8.12, *б* изображен приводимый в движение этим механизмом палец. В таких механизмах возможно использование двух вариантов приводов. Во-первых, в шарнирах *A* и *B* можно установить вращающийся привод, разворачивающий звенья *AD* и *BC*. Вращение привода будет преобразовано во вращательное движение звена *CD*, что приводит к наклону пальца. Во-вторых, для разворота звеньев *AD* или *BC* можно применить кривошипно-ползунный механизм, приводимый в движение поршнем (рис. 8.12, *а*). Использование четырехзвенного механизма позволяет захватывать объект, зацепляя его пальцем. Такой захват может иметь два и более пальцев.

Захваты с поступательным движением. Механизмы поступательного движения широко используются в захватах промышленных роботов. Такие захваты несколько сложнее, по сравнению с шарнирными. В простейшем захвате используется непосредственное смещение поршня. На рис. 8.13



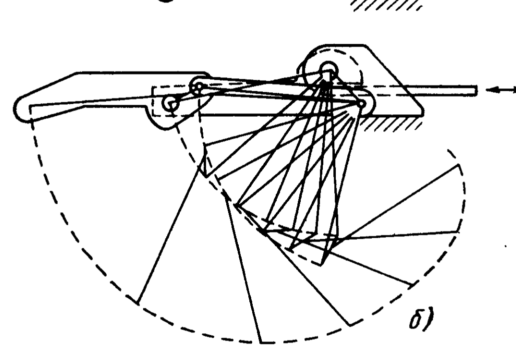


Рис. 8.12. Схема четырехзвенного механизма (*а*) и палец, построенный по схеме четырехзвенного механизма (*б*)

изображена схема такого захвата, в которой используется гидравлический поршень. Из

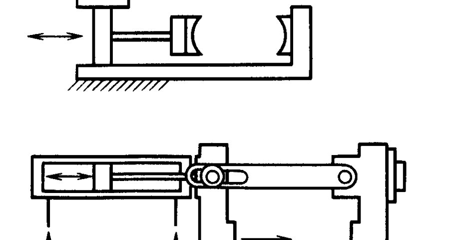


Рис. 8.13. Захват с поступательным движением и приводом от цилиндра с поршнем

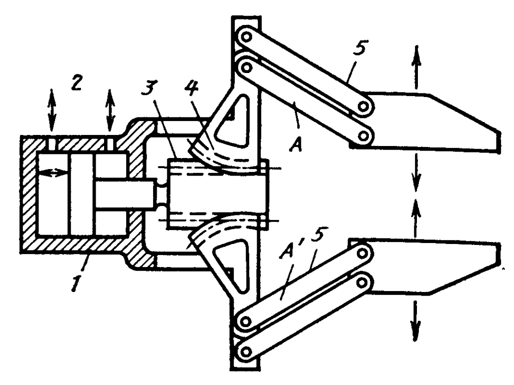


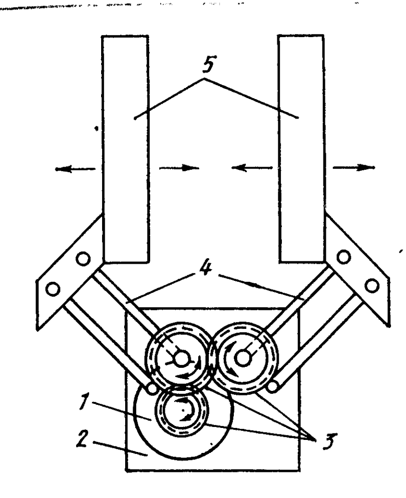
Рис. 8.14. Захват с параллельным движением поверхностей, приводимый в движение гидравлическим цилиндром и реечной зубчатой передачей:

1 — цилиндр с поршнем; *2* — управление давлением рабочего тела; *3* — реечная передача; *4* — зубчатая передача; *5* — параллелограммный механизм

схемы видио, что движение поршня передается непосредственно пальцу, без дополнительных звеньев. Недостатком такой схемы является то, что раствор пальцев захвата определяется размером привода. Это отрицательно сказывается иа компактности захвата. Такая схема используется для захватов с широко разводящимися пальцами.

На рис. 8.14 показана схема захвата, в состав которого входят пневматический или гидравлический цилиндр с поршнем, реечная зубчатая передача и два симметричных параллелограммных механизма, обеспечивающих параллельное перемещение пальцев при закрытии захвата. Такая схема используется очень широко. К двум зубчатым секторам присоединены звенья *A* и *A′*. Когда поршень цилиндра смещается влево, туда же смещается зубчатая рейка, разворачивая зубчатые секторы, соответственно по и против часовой стрелки, что приводит к раскрытию захвата, при этом ориентация пальцев сохраняется. Закрытие захвата, происходит аналогично при движении поршня вправо. Движение иа зубчатые сектора может передаваться и другим способом. На рис. 8.15 изображена схема механизма, в которой вместо поршня и зубчатой рейки используется вращающийся привод с зубчатой передачей.

На рис. 8.16 изображены две схемы построения захватов с вращающимися приводами. На рис. 8.16, *а* изображена схема механизма, состоящего из привода и реечной передачи. Достоинством такого захвата является возможность захватывания деталей в большом диапазоне размеров. На



ис. 8.15. Захват с параллельным движе-
ием поверхностей, приводимый в движе-
е вращающимся приводом с зубчатой
ередачей:

— вращающийся привод; 2 — монтажная плата;
— зубчатая передача; 4 — параллелограммный
еханизм; 5 — пальцы

ис. 8.16, *б* изображена схема механизма с
одовым винтом. При таком построении за-
вата можно осуществлять точное позици-
нное управление пальцами.

Устройство пальцев. В механических за-
ватах с жесткими пальцами их располо-
ение должно соответствовать форме за-
атываемого объекта. Для надежности за-
атывания желательно, чтобы форма по-
рхности пальцев повторяла форму по-
рхности захватываемых граней объекта
ис. 8.17). На рисунке углубления соответ-
вуют форме поверхности объекта. Напри-
р, для захвата цилиндрических объектов
лубления имеют цилиндрическую форму.
кая конструкция пальцев обеспечивает
льшую площадь соприкосновения с объ-
том и наиболее надежное захватывание
талей одного размера. Увеличение по-
хности соприкосновения при захватыва-
и позволяет распределить приложенное к
ьекту усилие.

Устройство захвата определяет его низ-
о адаптивность к изменению размеров
ьектов. Ее можно несколько увеличить,
и разместить на пальцах по нескольку
ублений, соответствующих деталям раз-
х размеров и формы. Пример такого за-
ата изображен на рис. 8.17, *б*.

На практике цилиндрические объекты
ечаются достаточно часто. Для их за-
атывания можно применять пальцы с V-
разными углублениями. При этом палец
нтактирует с объектом в двух местах.

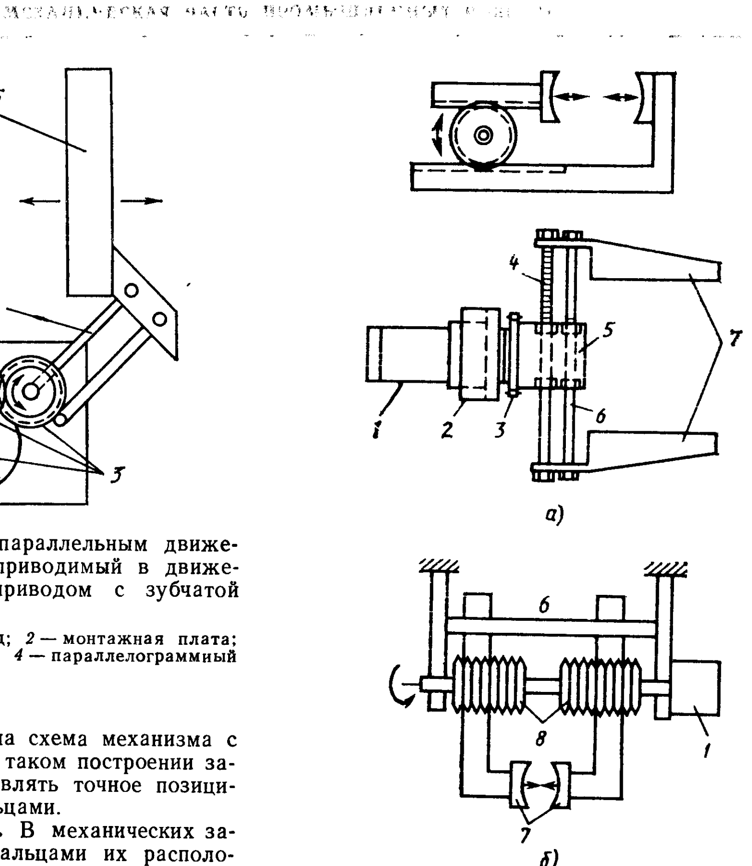


Рис. 8.16. Захват с поступательным движением, приводимый в движение вращающимся приводом и реечной зубчатой передачей (*а*) и захват с поступательным движением, приводимый в движение вращающимся приводом и ходовым винтом (*б*):

1 — вращающийся привод; 2 — монтажная плата; 3 — редуктор; 4 — реечная передача; 5 — коробка зубчатой передачи; 6 — направляющий стержень; 7 — пальцы; 8 — ходовой винт

В таком захвате большее усилие распределяется по меньшей поверхности соприкосновения, что может привести к повреждению или разрушению объекта. При работе с достаточно простыми объектами такой опасности не возникает, и в этих случаях пальцы с V-образными углублениями предпочтительнее, чем с углублениями, повторяющими форму объекта. Первое преимущество состоит в том, что с помощью одного углубления можно захватывать цилиндрические объекты разного диаметра, т. е. размеры углубления можно выбрать независимо от размеров объектов. Другое преимущество состоит в том, что такой захват проще в изготовлении. На рис. 8.18, *а* изо-

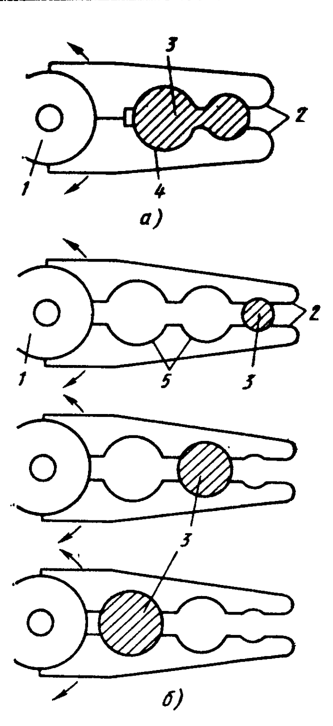


Рис. 8.17. Поверхность пальцев, повторяющая форму объекта (*а*) и поверхность пальцев с углублениями, соответствующими деталям различных размеров и форм (*б*):

1 — привод; 2 — пальцы; 3 — объект; 4 — углубление по форме объекта; 5 — несколько углублений

бражен типовой захват с V-образными углублениями на пальцах. Между геометрическими размерами V-образного углубления и диаметром захватываемого цилиндрического объекта существует связь. Введем в рассмотрение параметры захвата γ, β, R, R', L, l, a и b; точки B, C, Q, B', C', Q' и O; промежуточную систему координат $O = xy$ (см. рис. 8.18, *а*).

Из геометрических соображений ясно, что размеры объекта должны быть меньше размеров захвата, т. е. должно выполняться неравенство

$$x - R < \Delta s, \qquad (8.1)$$

где Δs — ширина звена. Расстояние между центром цилиндрического объекта и началом координат O равно x. Оно выражается следующим образом:

$$x = \sqrt{\left[L^2 + \left(\frac{R}{\sin\gamma} + a\right)^2 - 2L\left(\frac{R}{\sin\gamma} + a\right)\cos\beta\right] - l^2}. \qquad (8.2)$$

Для шарнирного захвата значение угла β постоянно. Для типового значения $\beta = 90°$ получаем:

$$x = \sqrt{L^2 + \left(\frac{R}{\sin\gamma} + a\right)^2 - l^2}. \qquad (8.3)$$

Для захвата, в котором поверхности углублений попарно параллельны, имеем:

$$\cos\beta = \frac{R' - 1}{L} \quad \left(R' = \frac{R}{\sin\gamma} + a\right). \qquad (8.4)$$

Подставляя уравнение (8.4) в (8.2), получаем для

$$x = \sqrt{L^2 - \left(\frac{R}{\sin\gamma} + a - l\right)^2}. \qquad (8.5)$$

При соприкасании объекта с каждым пальцем в двух точках параметры D, γ и b должны удовлетворять следующему неравенству:

$$D < 2\,b\tan\gamma, \qquad (8.6)$$

где D — диаметр цилиндрического объекта, равный $2R$.

Для шарнирного захвата выполняется другое соотношение, так как положение обоих пальцев по оси X меняется с изменением размеров объекта. Очевидно, что для того, чтобы захват был прочным и деталь не проскальзывала, продолжения линий QC и $Q'C'$ должны пересечься в точке P впереди захвата. Максимальный диаметр цилиндрического объекта, который может быть зафиксирован в захвате с заданными параметрами и геометрическими характеристиками углублений, определяется следующим неравенством:

$$D < 2\sin\gamma\left[L\tan\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) + \frac{l}{\tan\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right)}\right]. \qquad (8.7)$$

Для частного случая, когда l равно 0 (см. рис. 8.10), неравенство принимает вид:

$$D < 2\sin\gamma \cdot L\tan\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right). \qquad (8.8)$$

Для параллельного захвата неравенства (8.7) и (8.8) не имеют смысла, так как ориентация пальцев и, следовательно, V-образных углублений постоянна.

Из соотношений (8.1), (8.6), (8.7) и (8.8) можно определить максимальный диаметр объекта, который может быть зафиксирован в захвате с заданными геометрическими характеристиками.

Из соотношений (8.2), (8.3) и (8.5) видно, что координата X центра цилиндрического объекта зависит от его диаметра. На рис. 8.18, *б* показано отклонение $(O'O'' =$

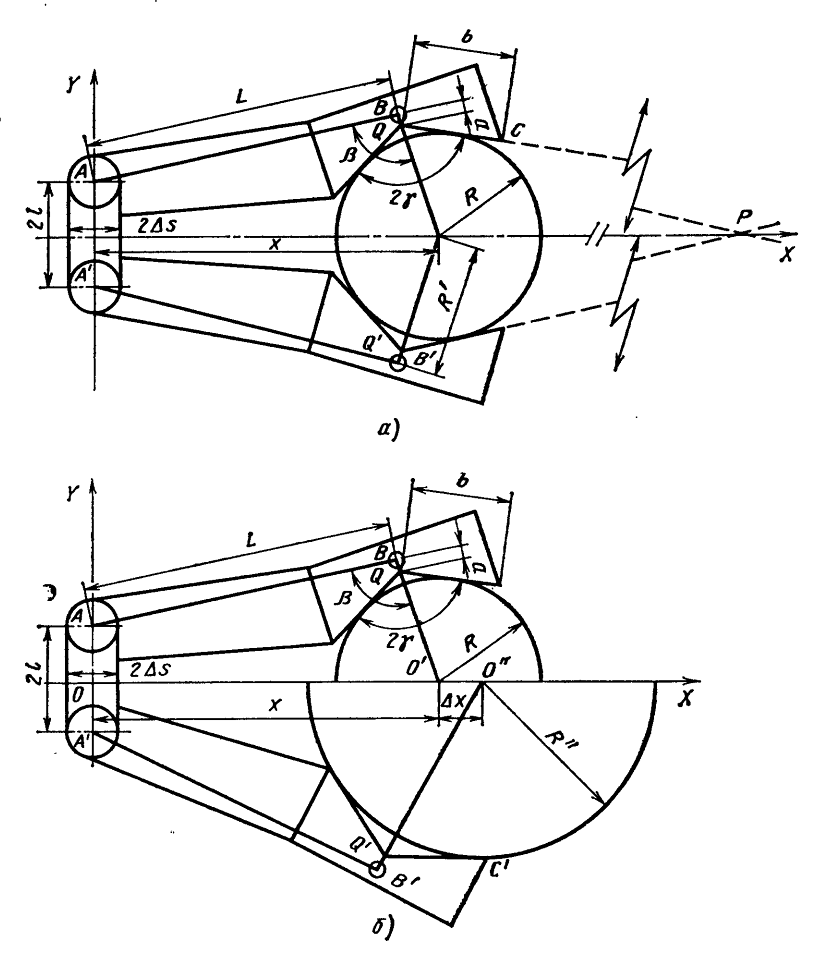


Рис. 8.18. Геометрическая схема захваченного цилиндрического объекта с использованием двух пальцев с V-образными углублениями на захватывающих поверхностях (*а*) и отклонение центров захваченных объектов (*б*)

$= \Delta x$) положений центров двух цилиндров разного диаметра. Такое отклонение может быть нежелательным [7].

На рис. 8.19 изображены зависимости величины $Dev = x - L$ (см. рис. 8.18, *б*), представляющей собой отклонение положения центра объекта от диаметра цилиндрического объекта, рассчитанные по уравнению (8.2). Предполагается, что объекты захватывались шарнирным захватом с $2\gamma = 140°$. Пунктирными линиями на графиках обозначены области превышения предельных значений диаметра детали, определяемых по неравеиству (8.7). Из графика видно, что захват с более длиными пальцами обеспечивает меньшее отклонение центра объекта. Для параллельных захватов эта величина меньше, чем для шарнирных захватов при одной и той же длине пальцев. Хороший захват с использованием реечной передачи или ходового винта (см. рис. 8.16) может обеспечить нулевое отклонение центра.

Для повышения надежности захватывания объекта применяются гибкие конструкции (рис. 8.20) [8]. Схема сегментов представлена на рис. 8.21. Смежные звенья и шкивы соединены шпильками и могут свободно вокруг них поворачиваться. Механизм приводится в действие с помощью двух тросов, каждый из которых связан с электродвигателями через редуктор и фрикционную муфту. Один трос называется захватывающим, так как обеспечивает

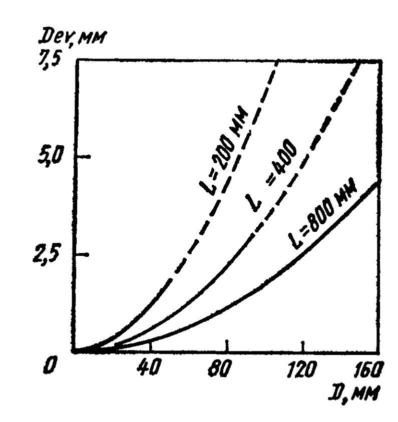


Рис. 8.19. Зависимость величины отклонения положения центра цилиндрического объекта $Dev = x - L$ от диаметра D при $\gamma = 140°$

закрытие захвата. Другой трос называется открывающим, так как действует в противоположном направлении и вызывает открывание захвата. При натяжении закрывающего троса пальцы отклоняются от своего первоначального положения. При этом поведение каждого звена определяется степенью его механического взаимодействия с захваченной деталью. В процессе захватывания, после того как i-е звено соприкасается с объектом, а натяжение троса продолжается, начинает поворачиваться в сторону детали следующее, $(i+1)$-е звено. Его движение продолжается до тех пор, пока и оно не соприкоснется с объектом. В результате объект обхватывается пальцами. Следует отметить, что при правильном расчете звеньев этой конструкции, можно достичь равномерного распределения давления на поверхность захваченного объекта.

Расчет усилия и момента захватывания. При проектировании захвата необходимо

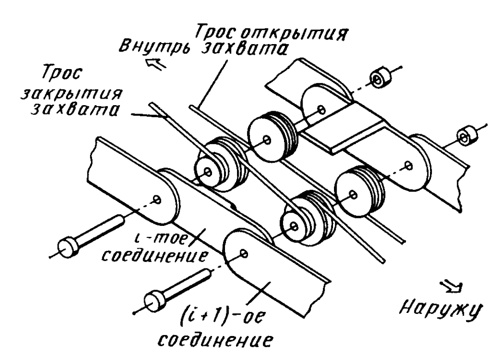


Рис. 8.21. Схема сегментов гибкого захвата

определить не только его геометрические характеристики, но и максимальное усилие (или момент) захватывания. Это усилие обеспечивается действием привода. Оно зависит от веса объекта и от трения в местах касания поверхностей пальцев поверхности объекта, от скорости перемещения робота и от расположения захвата по отношению к направлению перемещения манипулятора.

Наиболее неблагоприятные условия возникают, когда направление силы тяжести и ускорения движения захваченного объекта параллельны захватывающим поверхностям пальцев. При этом он удерживается только за счет трения. Тем не менее этот случай необходимо учитывать при определении максимального захватывающего усилия или момента.

Существуют различные способы захватывания объекта. На рис. 8.22 изображены два из них, и для каждого расчет захватывающего усилия выполняется по-своему. На рис. 8.22, *а* изображен цилиндрический объект, захваченный шарнирным захватом с двух сторон, так как центр тяжести объекта находится внутри захвата. На рис. 8.22, *б* изображен объект с плоскими гранями, захваченный параллельным захва-

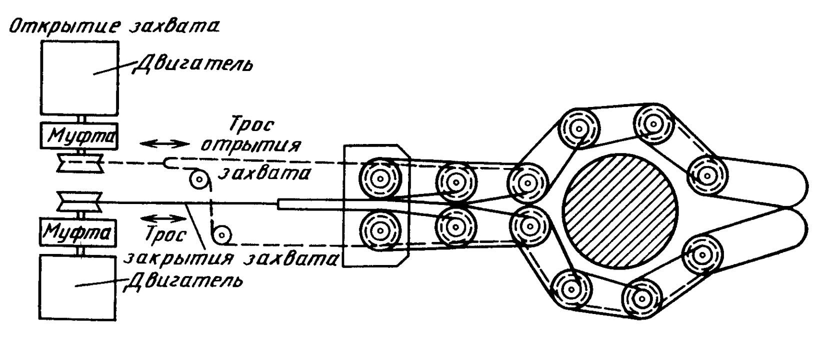
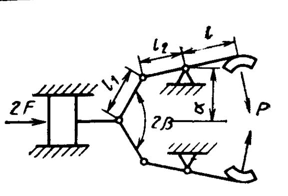
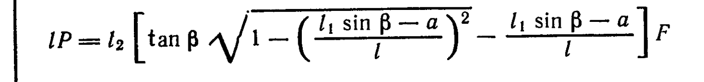
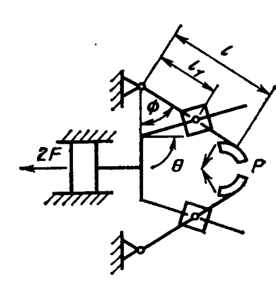
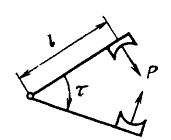
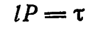
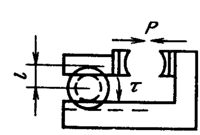
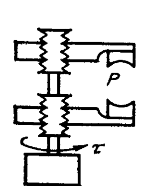
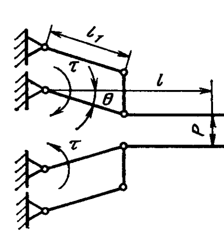


Рис. 8.20. Гибкий захват

2. Зависимости захватывающей силы от усилия на выходе привода

Тип механизма захвата и его параметры	Зависимость силы захвата от усилия на выходе привода
	 $lP = l_2\left[\tan\beta\sqrt{1-\left(\frac{l_1\sin\beta-a}{l}\right)^2}-\frac{l_1\sin\beta-a}{l}\right]F$
	$lP = l_1\,\frac{\cos(\psi-\theta)}{\cos\theta}\,F$
	 $lP = \tau$
	$P = \tau/l$
	$P = \frac{\tau}{r\tan\alpha}$
	$P = \frac{\tau}{l_1\cos\theta}$

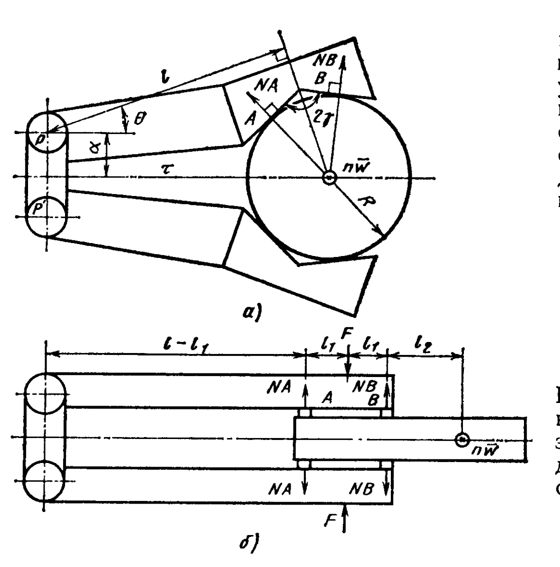


Рис. 8.22. Цилиндрический объект, захваченный шарнирным захватом с двух сторон так, что центр тяжести объекта находится внутри захвата (*а*), и объект с плоскими гранями, захваченный параллельным захватом с двух сторон так, что центр тяжести объекта находится вне захвата (*б*): ⊗ — центр тяжести объекта; $\overline{W}$ — вес объекта

том с двух сторон так, что центр тяжести объекта находится вне захвата.

В первом случае (см. рис. 8.22, *а*) силы NA и NB приложены в двух точках касания и действуют по нормали к поверхности объекта. Их можно выразить через величину захватывающего момента, который можно определить как сумму моментов, действующих относительно оси P:

$$NA = \frac{\tau}{\cos(\gamma-\theta)\,[a\tan\theta + l\cos\theta]}\times \frac{1}{[\tan(\gamma-\theta)+\tan(\theta+\gamma)]};$$
$$NB = \frac{\tau}{\cos(\gamma+\theta)\,[a\tan\theta + l\cos\theta]}\times \frac{1}{[\tan(\gamma-\theta)+\tan(\theta+\gamma)]}, \qquad (8.9)$$

где все параметры обозначены на рис. 8.22. Зная величину захватывающего усилия, можно вычислить силы трения, которые удерживают объект в захвате и приложены в точках соприкосновения пальцев и поверхности объекта. Эти силы равны μNA и μNB, где μ — коэффициент трения. Приложенные к этим же точкам сила тяжести и инерциальные силы не должны превышать по величине силу трения. Поскольку суммарная инерциальная сила, возникающая под действием ускорения ng (n-кратное ускорение свободного падения) приложена к центру тяжести захваченного объекта, то силы FA и FB, приложенные к точкам касания A и B соответственно, можно определить через значения суммарного момента в центре тяжести объекта.

Для точки A

$$FA = \frac{n\overline{W}\cos(\gamma+\theta)}{4\cos\gamma\cos\theta}. \qquad (8.10)$$

Для точки B

$$FB = \frac{n\overline{W}\cos(\gamma-\theta)}{4\cos\gamma\cos\theta}. \qquad (8.11)$$

Величина захватывающего момента должна быть определена из условия надежного захватывания без проскальзывания, т. е. должны быть определены оба неравенства одновременно.

Для точки A

$$FA < \mu NA. \qquad (8.12)$$

Для точки B

$$FB < \mu NB. \qquad (8.13)$$

Аналогично можно вычислить величину захватывающего усилия и в другом случае (см. рис. 8.22, *б*). Выражения для сил, вызванных трением и ускорением в точках соприкосновения поверхностей пальцев и объекта, а также связывающие их неравенства имеют вид:

$$NA = \frac{F}{2};\quad NB = \frac{F}{2}; \qquad (8.14)$$

$$FA = \frac{l_2}{2l_1}n\overline{W};\quad FB = \left(1+\frac{l_2}{2l_1}\right)n\overline{W}; \qquad (8.15)$$

$$FA < \mu NA;\quad FB < \mu NB. \qquad (8.16)$$

После того как определена максимальная величина захватывающего усилия или момента, можно перейти к вычислению силы или момента, который должен развиваться приводом. Для этого необходимо знать, как осуществляется преобразование развиваемого приводом момента (усилия) в захватывающий момент (усилие). Это преобразование определяется типом привода и устройством захвата. В табл. 8.2 приведены зависимости захватывающей силы от усилия на выходе привода для описанных выше конструкций захватов и приводов.

8.5.2. Антропоморфные захваты с тремя и пятью пальцами

Захват с тремя пальцами. Универсальность захвата можно повысить за счет увеличения количества пальцев и числа степеней подвижности. В результате этого

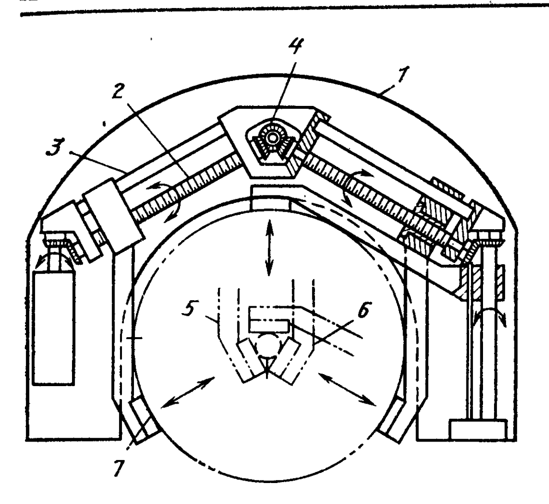


Рис. 8.23. Захват, построенный по схеме трехкулачкового патрона:

1 — основание; *2* — винт; *3* — направляющий стержень; *4* — коническая передача; *5* — первый палец; *6* — второй палец; *7* — зажим

конструкция захвата усложняется. И хотя принципы проектирования таких захватов еще не до конца определены, некоторый практический опыт уже имеется.

Конструкция простейшего захвата с тремя пальцами состоит из одного сочленения и привода особой структуры. Основным достоинством захвата с тремя пальцами является то, что поверхности пальцев и захваченного предмета соприкасаются в трех точках, что, во-первых, повышает надежность захватывания и, во-вторых, обеспечивает постоянное положение центра захваченного предмета сферической формы относительно захвата вне зависимости от его радиуса. Такие захваты строятся по схеме трехкулачкового патрона (рис. 8.23). Движение всех пальцев осуществляется с помощью ходовых винтов. Винты вращаются электродвигателем через конические зубчатые передачи. Вращение винтов по или против часовой стрелки преобразуется в поступательное движение пальцев и вызывает раскрывание или закрывание захвата.

На рис. 8.24 приведена схема многофункционального захвата с тремя пальцами [9]. В конструкцию захвата входят четыре электродвигателя и три пальца, которые могут вращаться с помощью специального механизма (при этом захват принимает одну из четырех возможных форм, рис. 8.25). Каждый палец приводится в движение своим электродвигателем, а сгибание пальцев осуществляется четырехзвенными механизмами.

Поворот пальцев осуществляется специальным механизмом разворота с двумя

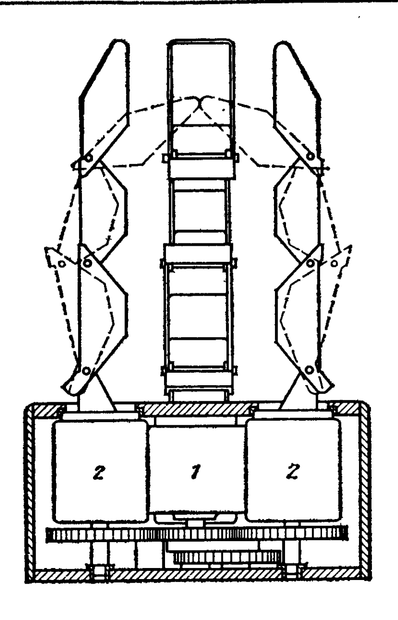


Рис. 8.24. Многофункциональный захват с тремя пальцами:

1 — двигатель поворота пальца; *2* — двигатель сгибания пальца

мертвыми точками (рис. 8.26). На схеме изображены участвующие в повороте пальцев зубчатые колеса, а стрелками обозначены направления сгибания пальцев (см. рис. 8.26, *а* — *г*). С помощью этого механизма последовательно осуществляется настройка захвата на грейферное, обхваты-

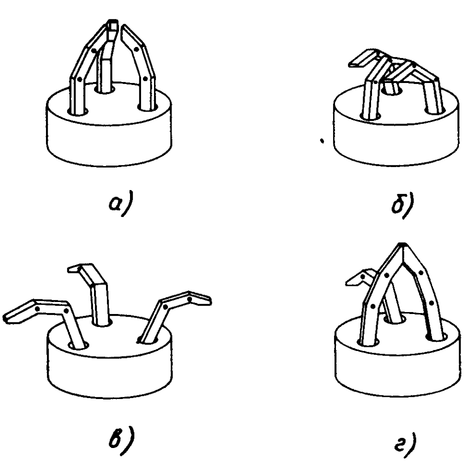


Рис. 8.25. Механические модели захватов различных типов:

а — грейферного; *б* — обхватывающего; *в* — распорного; *г* — щипкового

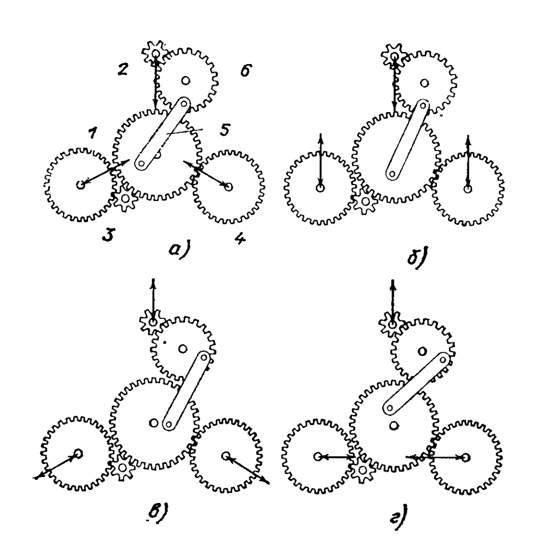


Рис. 8.26. Механизм разворота пальцев с двумя мертвыми точками:

1 — ведущая шестерня; *2* — шестерня первого пальца; *3* — шестерня второго пальца; *4* — шестерня третьего пальца; *5* — связывающее соединение; *6* — четырехзвенная передача

вающее, распорное и щипковое захватывание. Зубчатые колеса 2-го и 3-го пальцев непосредственно связаны с ведущим зубчатым колесом, а зубчатое колесо первого пальца — через сцепляющий рычаг. Вращение ведущего зубчатого колеса из положения, соответствующего грейферному захватыванию, разворачивает первый палец до прихода в метвую точку. После того как она пройдена, палец разворачивается в обратную сторону, уходя в положение, соответствующее обхватывающему захватыванию. Аналогично второй палец поворачивается против часовой стрелки на угол 60° от положения, соответствующего грейферному захватыванию, до положения, соответствующего захватыванию обхватывающего типа, затем на угол 120° против часовой стрелки до положения, соответствующего щипковому захватыванию. Третий палец при этом поворачивается на такие же углы, но по часовой стрелке. Описанный универсальный захват может применяться для работы с деталями разной формы.

Захваты с пятью пальцами. В настоящее время известно сравнительно мало конструкций захватов с пятью пальцами, из них лишь несколько используется в промышленности. Основная область их применения — протезирование. При этом с точки зрения человека внешний вид протеза важнее, чем его способность восполнить утраченную функцию. Этим объясняется антропоморфизм конструкций протезов. С другой стороны, для выполнения производственных операций, функциональные возможности важнее, чем внешний вид захвата. Поэтому при проектировании захватов промышленных роботов, антропоморфизм отходит на второй план. Тем объясняется малое количество конструкций пятипальцевых захватов для промышленных роботов. Тем не менее ниже описывается устройство захватов с пятью пальцами, применяющихся в протезировании, поскольку некоторые использованные в них конструкторские решения могут быть полезны при проектировании захватов промышленных роботов.

Для управления протезом инвалид должен вырабатывать управляющие воздействия. Число степеней подвижности протеза определяется наибольшим возможным числом независимых управляющих сигналов. Обычно захват протеза имеет одну степень подвижности. Все пальцы связаны с электродвигателем через передаточные механизмы.

На рис. 8.27 изображена кисть протеза «Вайм». В конструкции всех пальцев используются перекрестные четырехзвенные механизмы, обеспечивающие их сгибание. В состав одного звена каждого из пяти четырехзвенных механизмов входит кривошип. Кривошипы соединены подпружиненной пластиной *1*, которая может перемещаться поступательно с помощью электродвигателя и ходового винта *2*. При вращении привода по или против часовой стрелки пластина *1* перемещается соответственно влево или вправо, что вызывает сгибание пальцев (через четырехзвенные механизмы) и захватывание. Расположение пальцев должно быть точно рассчитано, чтобы объект надежно удерживался в захвате и соблюдался баланс сил, действующих в точках касания. В большинстве конструкций большой палец расположен напротив остальных четырех пальцев и равноудален от указательного и среднего пальца. Сгибаясь, концы пальцев встречаются в одной точке (рис. 8.28).

Если пальцы жестко связаны с приводами, то их движение строго определяется движением привода. При этом захват не может адаптироваться к изменению формы захватываемых объектов. Во избежание этого пальцы соединяются с приводом через упругие элементы.

На рис. 8.29 изображена схема такого захвата [11]. Его пальцы объединены в пары: указательный со средним и безымянный с мизинцем. Пары шарнирно связаны с рычагом *1*. Кроме того, рычаг *3* связывает рычаг *1* и рычаг *2* и шарнирно соединен с ними в точках *A* и *B*. Рычаг *2* может вращаться вокруг оси *D* и удерживаться пружиной *S*. При перемещении рычага *2* тросиком, присоединенным к нему в точке *C*,

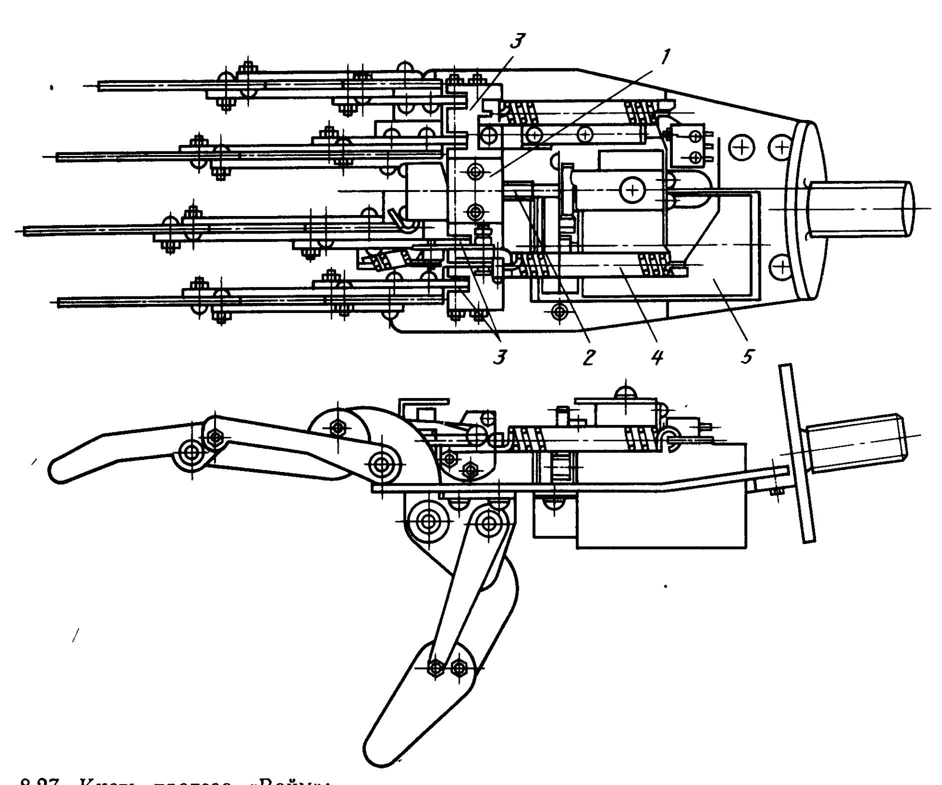


Рис. 8.27. Кисть протеза «Вайм»:

1 — пластина; *2* — шаровая пружина; *3* — кривошип; *4* — пружина; *5* — электродвигатель постоянного тока

пальцы начинают сдвигаться. Как только указательный и средний пальцы касаются объекта, их движение прекращается, а другая пара пальцев продолжает двигаться до касания поверхности предмета, так как рычаг *1* может вращаться относительно оси *A*. В результате этого пальцы лучше обхватывают поверхность предмета.

Возможно независимое перемещение пальцев, если каждый четырехэлементный механизм связать с отдельным электромотором. В таких случаях обычно исполь-

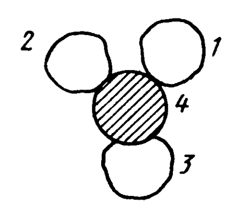


Рис. 8.28. Захват в трех точках:

1 — конец указательного пальца; *2* — конец среднего пальца; *3* — конец большого пальца; *4* — объект

зуются электродвигатели, смонтированные непосредственно в пальцах.

8.6. Универсальные захваты

В нескольких лабораториях исследовались универсальные захваты с большим числом степеней подвижности. С увеличением числа степеней подвижности сложность проектирования захвата возрастает (например, усложняется компоновка приводов, связанных со степенями подвижности). Для таких захватов необходимы миниатюрные приводы, способные, однако, развить достаточную мощность. Серийные приводы слишком велики. Одно из перспективных решений этой задачи заключается в использовании приводов на эффекте запоминания формы. Сегодня, однако, она чаще решается с помощью тросовых трансмиссий, позволяющих вынести двигатель за пределы звена.

Приведем два примера универсальных захватов. В обоих случаях используются тросовые трансмиссии с электродвигателями постоянного тока. На рис. 8.30 изображен

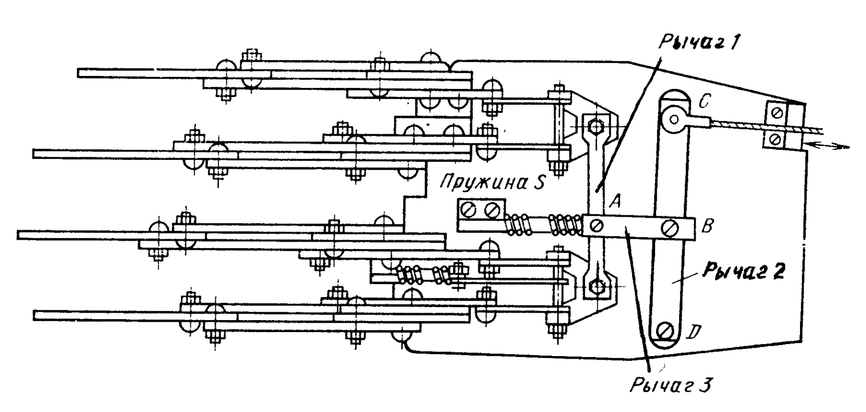


Рис. 8.29. Протез руки с механизмом адаптации

захват, состоящий из трех пальцев: большого, указательного и среднего [12]. Обычно трех пальцев для универсального захвата вполне достаточно. Каждый палец состоит из двух или трех сегментов, изготовленных из медного стержня цилиндрической формы диаметром 17 мм. Концы сегментов сточены под углом 30° так, чтобы каждый палец мог сгибаться на угол до 45° как внутрь, так и наружу в каждом сочленении, т. е., возможности такого пальца шире, чем у человеческого.

Большой палец состоит из трех звеньев. Каждое звено приводится в движение электрическим двигателем через тросовую трансмиссию и имеет одну степень подвижности. В каждом звене имеется блок, на который встречно навиты два тросика, причем их концы закреплены на блоке. Тросики заключены в спиральную оболочку, что предотвращает их зацепление при движении пальцев. Спиральная оболочка предохраняет тросик и позволяет уменьшить количество блоков в трансмиссии. Чтобы движение пальцев было более гибким, а весь захват более компактным, тросики в оболочке введены внутрь пальцев. Схема приводов захвата изображена на рис. 8.31. Двигатели, обслуживающие смежные звенья,

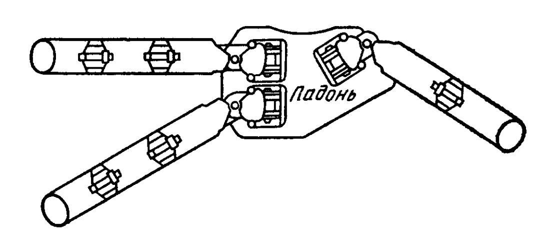
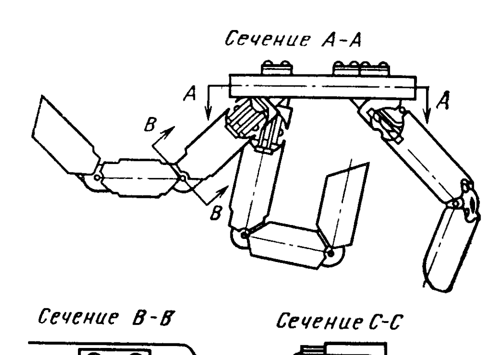
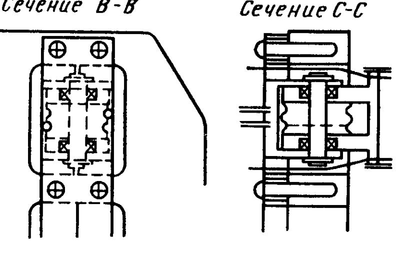
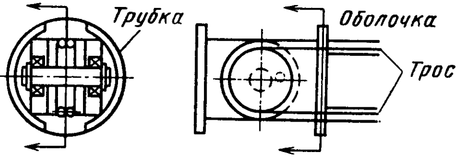


Рис. 8.30. Универсальный захват из трех пальцев







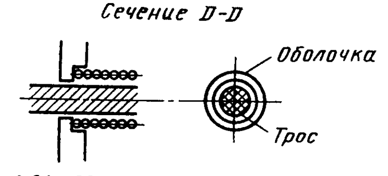


Рис. 8.31. Механизм привода звеньев универсального захвата

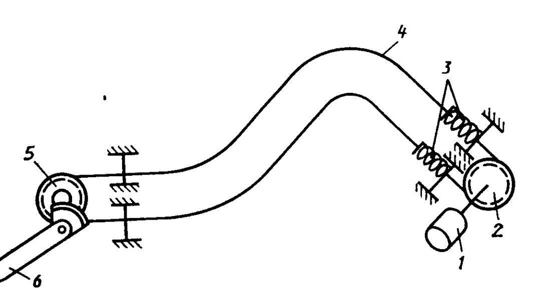


Рис. 8.32. Конструкция привода с креплением оболочки тросов через пружины: *1* — электродвигатель постоянного тока; *2* — шкив; *3* — пружины; *4* — трос в оболочке; *5* — шкив и цепочка передач; *6* — палец

асположены рядом внутри корпуса, вынеенного за пределы захвата.

Благодаря использованию спиральных болочек упрощается прокладка трансмисий, но возникает трение между тросиками оболочкой. Его можно уменьшить, закрепяя спиральные оболочки через пружины 13]. На рис. 8.32 показана конструкция направляющего механизма, причем оболочка росика закреплена на пружинах. При сгиании жестко закрепленной оболочки просходит ее растяжение. В результате этого меньшается ее поперечное сечение, что риводит к увеличению трения. В конструкии, изображенной на рис. 8.32, при сгибаии оболочки будет растягиваться не оболочка, а пружина. Таким образом, в реультате изменения конфигурации оболочки лощадь ее поперечного сечения не меняетя и трение не увеличивается. В случае заквата с пятью пальцами для каждого звена спользуются приводы описанной конструкции (см. рис. 8.32). Эта система имеет 14 степеней подвижности, каждая из которых приводится от индивидуального электродвигателя постоянного тока. Большой палец имеет две степени подвижности, а остальные пальцы — по три. Звенья сконструированы таким образом, что возможно позиционное управление концами пальцев в пределах их рабочих зон.

Захват, изображенный на рис. 8.30, при использовании системы управления с обратной связью может выполнить различные манипуляции с брусками и сферическими предметами, закручивать болты, а захват из пяти пальцев может играть на пианино по заданной программе. Чтобы обеспечить надежное захватывание, требуется согласованное движение всех пальцев. Применяется алгоритм согласованного управления, основанный на методе потенциалов, описанном в [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schlesinger, G., Der Mechanische Aufbau der kunstlichen Glieder, *Ersatzglieder und Arbeitshilfen*, Part II, Springer, Berlin, Germany, 1919.
2. Grossley, F. R. E. and Umholts, F. G., Design for a Three-Fingered Hand, in Heer, E., Ed., *Robot and Manipulator Systems*, Pergamon Press, Oxford, 1977, pp. 85—93.
3. Morecki, A., Ekiel, J., and Fidelus, K., Some Problems of Controlling a Live Upper Extremity and Bioprosthesis by Myopotential External Control of Human Extremities, *Proceedings of the Second Symposium on External Control of Human Extremities*, Belgrade, Yugoslavia, 1967.
4. Asada, H. and Kanade, T., Design of Direct-Drive Mechanical Arms, Robotics Institute, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, 1981.
5. Sheldon, O. L., Robots and Remote Handling Methods for Radioactive Materials, *Proceedings of the Second International Symposium on Industrial Robots*, Chicago, Illinois, pp. 235—256.
6. Chen, F. Y., *Gripping Mechanisms for Industrial Robots, Mechanism and Machine Theory*, Vol. 17, No. 5, Pergamon Press, Oxford, 1982, pp. 299—311.
7. Osaki, S. and Kuroiwa, Y., Machine Hand for Bar Works, *Journal of Mechanical Engineering Laboratory*, Vol. 23, No. 4, Mechanical Engineering Laboratory, MITI, Tsukuba, Japan, 1969 (in Japanese).
8. Hirose, S. and Umetani, Y., The Development of a Soft Gripper for the Versatile Robot Hand, *Proceedings of the Seventh International Symposium on Industrial Robots*, Tokyo, Japan, 1977, pp. 353—360.
9. Skinner, F., Design of a Multiple Prehension Manipulator System, ASME Paper, 74-det-25, 1974.
10. Kato, I., Yamakawa, S., Ichikawa, K., and Sano, M., Multi-functional Myoelectric Hand Prosthesis with Pressure Sensory Feedback System — Waseda Hand 4P, *Proceedings of the Third International Symposium on External Control of Human Extremities*, Belgrade, Yugoslavia, 1969.
11. Maeda, Y., Fujikawa, A., Tanie, K., Abe, M., Ohno, T., Tani, K., Honda, F., Inanaga, T., Yamanaka, T., and Kato, I., A Hydraulically Powered Prosthetic Arm with Seven Degrees of Freedom (Prototype-I), *Bulletin of Mechanical Engineering Laboratory*, No. 27, Tsukuba, Japan, 1977.
12. T. Okada, On a Versatile Finger System, *Proceedings of the 4th International Symposium on Industrial Robots*, Tokyo, Japan, 1977, pp. 345—352.
13. Sugano, S., Nakagawa, J., Tanaka, Y., and Kato, I., The Keyboard Playing by an Anthropomorphic Robot, *Preprints of Fifth CISM-IFTomm Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators*, Udine, Italy, 1984, pp. 113—123.
14. Hanafusa, H., and Asada, H., Stable Prehension by a Robot Hand with Elastic Fingers, in Brady, M. et al., Eds., *Robot Motion*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1983, pp. 337—359.

Список дополнительной литературы

Engelberger, J. F., *Robotics in Practice*, Kogan Page Ltd., London, 1980.
Kato, I., Ed., *Mechanical Hand Illustrated*, Survey Japan, Tokyo, Japan, 1982.
Timoshenko, S. and Young, D. H., *Engineering Mechanics*, McGraw-Hill, New York, 1956.

Глава 9
УСТРОЙСТВО ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

В. Бук, Технологический институт, г. Атланта, шт. Джорджия

Телеуправляемым называется манипулятор, который работает по командам или под наблюдением оператора. В названии отражено, что манипулятор находится на некотором расстоянии от оператора. Телеуправляемые манипуляторы (ТМ) и манипуляторы роботов имеют много общего с точки зрения используемых конструкторских решений. Однако в отличие от робота в работе ТМ постоянное активное участие принимает оператор. И, как следствие этого, в конструкциях ТМ большое внимание уделяется вопросам построения интерфейса с человеком. В процессе выполнения задания оператор совершенствует свои знания и навыки, сталкиваясь иногда с непредвиденными ситуациями. Когда оператор осуществляет лишь диспетчерское управление ТМ, или программист выполняет обучение робота проводкой, то различия между роботами и телеуправляемыми манипуляторами стираются.

Сфера применения телеуправляемых устройств (ТУ) в производстве широка и включает в себя в основном действия, которые не может выполнить человек. К таким действиям относится работа в опасных или вредных условиях или операции, требующие чрезмерных усилий. Если задание хорошо поддается описанию и повторяется, то для его выполнения лучше использовать робота. ТУ целесообразно использовать, когда для выполнения задания требуются человеческие знания и опыт или если операция не повторяется. Такие ситуации возникают довольно часто: в атомной энергетике и военной промышленности, литейном производстве и разработке полезных ископаемых. Краны, погрузчики и другое подъемно-транспортное оборудование тоже относятся к ТУ. Для широкого освоения космоса требуется использование на космических кораблях манипуляторных систем с дистанционным управлением и малых манипуляторов. В мелкосерийном производстве при частой смене производственных заданий требуется перепрограммирование робота, при этом большое внимание приходится уделять оптимизации его работы в процессе обучения. Программирование робота в режиме обучения имеет много общего с телеуправлением.

В этой главе рассматриваются специфические вопросы проектирования механических манипуляторов для работы в режиме телеуправления. Изложение материала носит общий характер и охватывает широкий спектр ТУ с различными кинематическими схемами, размерами, задающими устройствами. Если по описанию задания, которое должен

будет выполнить манипулятор, и его конструктивным параметрам можно определить технические характеристики, то появляется возможность оптимизации в процессе проектирования. Сложность оценки технических характеристик ТМ заключается в том, что приходится учитывать присутствие оператора. Из-за того, что «технические характеристики» человека могут меняться в очень широком диапазоне, точно рассчитать технические характеристики ТМ (как это делается для роботов) невозможно. Тем не менее в процессе проектирования на основании далеко не полной информации очень важно построить адекватную модель человеко-машинной телеуправляемой системы, по которой можно проследить влияние используемых конструкторских решений на ее технические характеристики. При проектировании должны учитываться эргономические аспекты, описанные в соответствующих справочниках (см. например, [1]). В настоящей главе эргономические вопросы проектирования ТМ не рассматриваются.

9.1. Подсистемы телеуправляемых устройств и терминология

Используемая в этой главе терминология представлена на рис. 9.1. В состав телеуправляемой системы входят исполнительное устройство, которое выполняет все операции, устройство управления для ввода команд оператора и связывающие их каналы связи.

В состав исполнительного устройства обычно входит манипулятор с рабочим органом для захвата объектов, находящихся в рабочем пространстве, и специальных инструментов. Сочленения обеспечивают степени подвижности манипулятора. Различают сочленения (и звенья) вращательные (или шарнирные) с одной осью вращения и поступательные (или скользящие) с одним направлением перемещения. Перемещение рабочего органа определяется перемещением сочленений и звеньев. Для произвольного позиционирования рабочего органа в пределах рабочего пространства требуется не менее шести степеней подвижности. Обычно каждое звено имеет свой привод. Различают электромеханические, гидравлические и пневматические приводы. Положение звена определяется перемещением его привода и зачастую системой сервоуправления, исходными данными для работы которой являются погрешности между заданными и фактическими значениями координат и скоростей. Систему сервоуправления иногда называют обратной связью или замкнутой системой управления. Разомкнутая система управления не предполагает определения фактического положения, поскольку обратная связь отсутствует. В разомкнутых системах управления без обратной связи используются шаговые электродвигатели и гидравлические приводы, способные создавать удерживающий момент.

В устройство управления должны входить средства ввода воздействий, с помощью которых оператор управляет исполнительным устройством. Для ввода команд могут использоваться кнопочный пульт или клавиатура. Для ввода управляющих воздействий в аналоговой форме — мнемоническая рукоятка или задающее устройство, кинематически эквивалентное исполнительному устройству. Устройство управления должно преобразовывать управляющие воздействия оператора в форму, удобную для передачи исполнительному устройству через каналы связи. Аналоговые управляющие воздействия, адресованные отдельным звеньям, могут передаваться по отдельным подканалам канала связи или преобразовываться в цифровую форму и передаваться

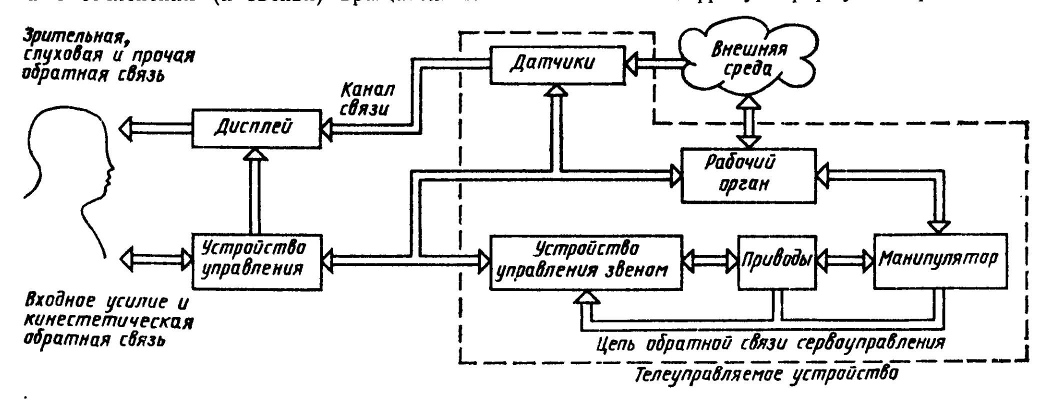


Рис. 9.1. Блок-схема телеуправления и используемая терминология

через мультиплексор без выделения подканалов. Физически канал связи представляет собой коаксиальный кабель, линию радиосвязи или ультразвуковой связи (в зависимости от среды, в которой работает исполнительное устройство).

9.2. Классификация телеуправляемых устройств

Один из способов классификации ТУ рассматривает их источники энергии. В ранних моделях ТУ использовалась механическая передача усилий оператора через металлические тросы, ленты или тяги. В таких системах ограничены предельное удаление исполнительного устройства от оператора, скорость перемещения и развиваемое усилие. Управление и привод по всем степеням подвижности осуществляются непосредственно оператором. Преимуществом такой непосредственной системы привода является прямая передача по цепи обратной связи оператору сил, действующих на исполнительное устройство.

Использование внешних источников энергии не только расширяет возможности ТУ, но и влечет за собой дополнительные трудности. Оператор вводит в систему управления сигналы, согласно которым изменяется усилие, развиваемое исполнительным устройством. При этом оператор затрачивает гораздо меньше мышечных усилий, но, если он не получает информации о действующих усилиях, эффективность его работы резко снижается.

Другая классификация (по типу интерфейса с оператором) распределяет ТУ в порядке возрастания их сложности.

А. Управление включением-выключением позволяет останавливать и запускать приводы звеньев в том или ином направлении (с фиксированной скоростью). Это самый простой способ организации интерфейса. При этом возможно одновременное некоординированное перемещение нескольких звеньев.

Б. При управлении скоростью движения звеньев оператор задает скорости перемещения каждого из звеньев, для чего «в уме» выполняет преобразование координат рабочего органа в координаты звеньев. Это непростая задача, особенно для неопытных операторов. Сложность задачи возрастает с усложнением конструкций звеньев и траектории движения. Проще осуществить движение по прямой, управляя тремя ортогональными поступательными звеньями, чем осуществить такое же движение, управляя манипулятором из трех вращательных звеньев. Вследствие простоты реализации, управление скоростью перемещения звена используется во многих промышленных устройствах (краны, тельферы, подъемники).

В. Копирующее управление позволяет оператору задавать положение рабочего органа исполнительного устройства, манипулируя задающим устройством. Команды приводов звеньев формируются либо непосредственно (в случае подобия задающего и исполнительного устройств), либо в результате математического преобразования координат в устройстве управления. Пропорциональное преобразование управляющего воздействия при передаче от задающего к исполнительному устройству выполняет оператор. При больших значениях масштабного коэффициента начинает сказываться ограниченная разрешающая способность оператора.

Г. Копирующее управление с моментным загружением выполняет все функции простого копирующего управления. В дополнение к этому на задающее устройство подаются силовые воздействия, пропорциональные нагрузкам, испытываемым исполнительным устройствам. Иногда задающее и исполнительное устройства бывают идентичными и отличаются только рабочим органом. В других случаях сопротивление задающего органа не равно, а пропорционально усилию, приложенному к исполнительному устройству, что снижает утомляемость оператора.

Д. Управление скоростью приведенных перемещений позволяет оператору задавать скорость движения рабочего органа. Команды приводам удаленного манипулятора вырабатываются в результате математических преобразований. Оператор осуществляет управление с помощью кнопочного пульта или рукояток. При использовании кнопочного пульта требуется индивидуальное воздействие оператора для выдачи команды по каждой оси, однако ввод координат для выполнения задания можно организовать в удобной для человека форме. С помощью рукоятки можно в естественной форме управлять несколькими степенями подвижности одновременно. Управлять шестью степенями подвижности можно при помощи двух мнемонических рукояток — одной для поступательного движения, а другой — для вращательного.

Е. Диспетчерское управление может организовываться различными способами, но общим является то, что используется не аналоговая, а символьная форма представления команд, задающих перемещения. Команды из символьной формы преобразуются в управляющие воздействия звеньев с помощью ЭВМ. Интерфейс с оператором обладает свойствами управления ТУ и управления роботом. Подробнее об этом — в других главах справочника.

9.3. Проектирование телеуправляемых устройств

При проектировании ТУ обычно приходится определять технические характеристики и параметры различных устройств. Они во многом определяют технические характеристики манипулятора в целом. Зная характеристики ТУ и задания, можно оценить относительную производительность манипулятора. При оптимизации конструкции манипулятора наряду с производительностью следует учитывать затраты и надежность. В настоящей главе рассматриваются соотношения между производительностью и характеристиками, специфичные для ТУ. Обзор методов оценки производительности приведен в сообщении лаборатории при Национальном бюро по стандартам по этой тематике [2].

9.3.1. Измерение производительности телеуправляемых устройств

Наиболее часто используемая численная оценка производительности манипулятора связана со временем выполнения задания. При этом производятся измерения общего времени выполнения задания, коэффициента временной эффективности (отношение ко времени выполнения этого задания вручную) и времени выполнения отдельных операций (время работы по выполнению элементарных частей задания). Не менее важны работоспособность оператора, его коэффициент полезного действия и качество выполнения задания, но эти параметры трудно оценить количественно. Для количественной оценки производительности необходимо формальное описание задания или класса заданий. Характеристики производительности в некоторой степени зависят от типа задания. Особенно существенна эта зависимость для заданий, выполняемых ТУ. К сожалению, формализовать все задания невозможно, поскольку ТУ являются универсальными устройствами. И для лучшей оценки полученных результатов приходится использовать различные методы измерения производительности.

Информационная оценка производительности. Производительность можно оценивать по скорости передачи информации ТУ. Хотя эта скорость в некоторой степени зависит от типа задания, эту зависимость можно легко учесть, анализируя его простейшие характеристики. Объем передаваемой оператором информации определяется количественным уменьшением неопределенности относительного положения рабочего органа и объекта и измеряется в битах. Скорость передачи информации определяется временем, необходимым для передачи этой информации. Экспериментально она определяется следующим образом. Замеряется время выполнения задания (с учетом коэффициента его сложности) и затем результат нормируется. Предложенный Фиттсом [3] коэффициент сложности задания используется для оценки операций позиционирования объектов вручную и равен

$$I_d = \log_2 \frac{2A}{B},$$

где A — расстояние между объектами при повторяющихся перемещениях; B — размеры мишени. Для ТУ коэффициент сложности и его производные применялись Буком и Ханнема [4] для анализа простейших манипуляторов с программно управляемыми динамическими характеристиками и Мак Говерном [5] для более сложных манипуляторов с фиксированными динамическими характеристиками. Хилл [6] использовал этот метод в сочетании с пооперационным подходом (см. ниже) для прогнозирования продолжительности выполнения задания. Им и его соавторами были получены результаты, из которых видно, что влияние скорости передачи информации сказывается особенно сильно при точных перемещениях и подводе рабочего органа к объекту. При простых перемещениях определяющую роль играют динамические характеристики манипулятора и человеческой руки.

Коэффициент временной эффективности. Часто используется другая характеристика производительности — коэффициент временной эффективности задания. При умножении времени выполнения задания вручную на этот коэффициент получается оценка времени выполнения того же задания ТУ. Этот коэффициент удобен для грубой оценки производительности, но его значение сильно зависит от типа задания. Отмечено, что для однотипных манипуляторов и заданий примерно одинаковой сложности этот коэффициент практически один и тот же.

Продолжительность выполнения операций. Большинство практических методов оценки производительности ТУ при выполнении конкретного задания основаны на учете времени выполнения подзаданий или элементарных операций. Для данного манипулятора можно приблизительно определить время, затрачиваемое на выполнение таких операций, как перемещение, захватывание, фиксация и отпускание объекта (некоторые из этих операций имеют параметры). К сожалению, связь этих величин с эксплуатационными и конструкторскими характеристиками манипулятора не поддается формализации.

9.1. Описание элементарных операций манипулятора

Операция	Описание операции и факторы, влияющие на ее продолжительность
Перемещение (d)	Перемещение рабочего органа на расстояние d мм. Продолжительность сокращается с возрастанием скорости движения манипулятора. Хилл [15] отмечает линейную зависимость от d
Поворот (a)	Поворот рабочего органа относительно оси предплечья на a градусов. Ускоряется при использовании силовой обратной связи (на 50—100 %) и при использовании устройств пассивной податливости. Замедляется при наличии трения и отдачи
Сжатие	Увеличение силового воздействия при фиксации объекта. Ускоряется при силовой обратной связи. Увеличивается при наличии трения
Захватывание	Закрытие рабочего органа при фиксации объекта. Ускоряется при силовой обратной связи и увеличении скорости захвата
Отпускание	Раскрывание рабочего органа и освобождение объекта. Ускоряется при использовании обратной связи и увеличении скорости
Установка рабочего органа на объект (t)	Выравнивание положения и ориентации рабочего органа с точностью t мм. Замедляется с увеличением трения и мертвого хода
Вставление (t)	Совмещение двух объектов по определенной траектории с точностью t мм. Ускоряется при использовании силовой обратной связи. Замедляется с увеличением трения и мертвого хода. Нелинейно зависит от точности
Разъединение (t)	Операция обратная вставлению. Сильно ускоряется при наличии силовой обратной связи и малых значениях t (в два раза). Замедляется с ростом трения и мертвого хода

Продолжение табл. 9.1

Операция	Описание операции и факторы, влияющие на ее продолжительность
Сгибание	Движение по окружности в процессе «сгибания» шарнира. Значительно ускоряется при наличии силовой обратной связи (на 50—100 %) или устройства пассивной податливости
Касание	Достижение контакта с поверхностью, гранью и т. д. Ускоряется при наличии силовой обратной связи

9.3.2. Формальное описание задания

Поскольку невозможно заранее определить производительность манипулятора для произвольного задания, приходится проводить дифференциацию, что требует выделения основных характеристик. Еще важнее знать значения характеристик задания (даже приблизительные) при проектировании новых ТУ. В формуле Фиттса используется такая характеристика задания, как отношение расстояния до объекта к точности позиционирования (A/B). Более сложные характеристики определяются с количеством степеней подвижности, необходимых для приведения рабочего органа в заданное положение. Например, при позиционировании рабочего органа относительно объекта с заданной точностью по одному направлению требуется одна степень подвижности, а остальные пять не используются. При вставлении шарообразного предмета в круглое отверстие требуются две степени подвижности. При вставлении прямоугольной шпильки в прямоугольное отверстие надо иметь возможность перемещения в трех направлениях и изменения ориентации в двух направлениях, т. е. не используется только одна степень подвижности. При выполнении самоцентрирующихся операций вставления (например, с использованием фасок) такую количественную оценку дать трудно. В подобных случаях главную роль играют такие характеристики манипулятора, как упругость и реакция на силовые воздействия.

Кроме того, как было упомянуто выше, для описания задания можно использовать описание операций, его составляющих. Пооперационный подход оценки труда рабочих был разработан в 1880 г. Тейлором [7], а затем усовершенствован Гилбрейтом [8].

Нилл [9] разработал перечень элементарных операций для манипуляторов (табл. 9.1). Пока еще эта система не получила широкого распространения, но уже имеются многообещающие результаты ее применения. Для оптимизации конструкции желательно определить функциональные зависимости, связывающие продолжительности выполнения элементарных операций с характеристиками манипулятора. К сожалению, в общем случае это невозможно, но конструктор может оценить, какие характеристики манипулятора будут оказывать основное влияние на скорость выполнения элементарных операций. Экспериментальным путем получены количественные и качественные оценки такого влияния.

9.3.3. Конструктивные характеристики телеуправляемых устройств

Влияние важнейших конструктивных характеристик ТУ на их производительность должно учитываться при их проектировании. Поскольку номенклатура ТУ очень широка, имеет смысл ограничиться общими характеристиками, определенными для большинства устройств. Зависимость этих характеристик от конструкций ТУ такая же, как у роботов. Некоторым из этих характеристик можно дать количественную оценку, для остальных возможна только качественная оценка.

Различные авторы выделяют следующие конструктивные характеристики.

Радиус действия, размеры и форма рабочего пространства.

Площади, занимаемые исполнительным и задающим устройствами.

Пространственная гибкость.

Число степеней подвижности.

Предельные скорости, ускорения и усилия под нагрузкой и без нее.

Точность, воспроизводимость повторного позиционирования и разрешающая способность по координатам, усилию и скорости.

Мертвый ход, биения.

Трение качения и скольжения в задающих и исполнительных устройствах.

Частотные характеристики исполнительного устройства по входному воздействию малой амплитуды.

Задержка между выдачей команды управляющим устройством и началом действий исполнительного устройства.

Жесткость или податливость исполнительного устройства по отношению к действию внешних сил.

Инерциальность управляющего и исполнительного устройств.

Статические нагрузки, преодолеваемые приводами исполнительного устройства или оператором, работающим с задающим устройством.

Значительность этих характеристик зависит от способа их использования. Ниже рассматривается их влияние на производительность и устройство ТУ.

9.4. Оценка производительности

В большинстве исследований оценивается производительность конкретного манипулятора при выполнении некоторого задания в режиме телеуправления. Конструкторы, наоборот, должны определить необходимую производительность проектируемого манипулятора и выработать конструкторские решения, которые позволят эту производительность обеспечить. Ниже приводятся некоторые результаты, достигнутые в решении подобных задач. Приводится оценка существующих манипуляторов.

9.4.1. Зависимость времени выполнения операции от коэффициента сложности для различных частотных характеристик, мертвого хода и трения

Практически все приводимые результаты взяты из книги Ханнема и Бука [4]. Они были получены экспериментально на простом манипуляторе с двумя степенями подвижности и программно управляемыми характеристиками. Рассматривались наиболее важные для определения производительности манипулятора характеристики: полоса пропускания системы сервоуправления манипулятором, мертвый ход и сухое трение. В качестве задания был выбран простейший повторяющийся процесс позиционирования с перемещением предмета и его установкой с заданной точностью. Схема эксперимента изображена на рис. 9.2. Были получены значения продолжительности операций для

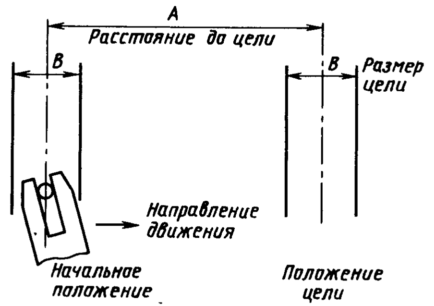


Рис. 9.2. Схема эксперимента для определения ряда характеристик манипулятора

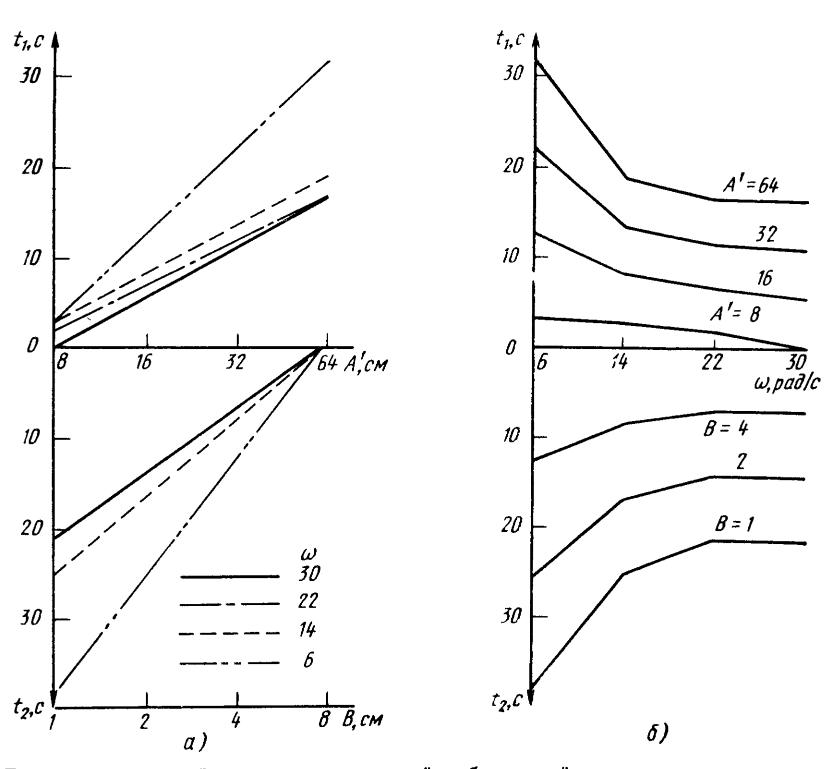


Рис. 9.3. Графики регрессий для ряда значений собственной частоты:
а — простое t_1 и точное t_2 перемещения; *б* — форма представления для конструктора; ω — собственная частота

различных вариантов задания и значений параметров манипулятора. Следует отметить, что рассматривались только операции позиционирования, причем при выполнении задания учитывалось лишь одно ограничение: позиционирование считалось успешным при попадании объекта в любую точку на линии; было использовано простейшее копирующее управление без моментного загружения; не рассматривались все возможные сочетания характеристик манипулятора, одновременно изменялось значение только одной характеристики, а величины остальных оставались постоянными.

Модель передачи информации. Использовалась усовершенствованная модель передачи информации, аналогичная предложенной Велфордом [10]. Модель позволяет учитывать различные способы передачи информации для простых перемещений при выполнении движения в сторону мишени и сложных перемещений на стадии совмещения с мишенью, что отражает различную нагрузку на канал передачи информации:

$$t = b_1 \log_2 \frac{2A'}{W_0} + b_2 \log_2 \frac{W_0}{B} + a$$

или

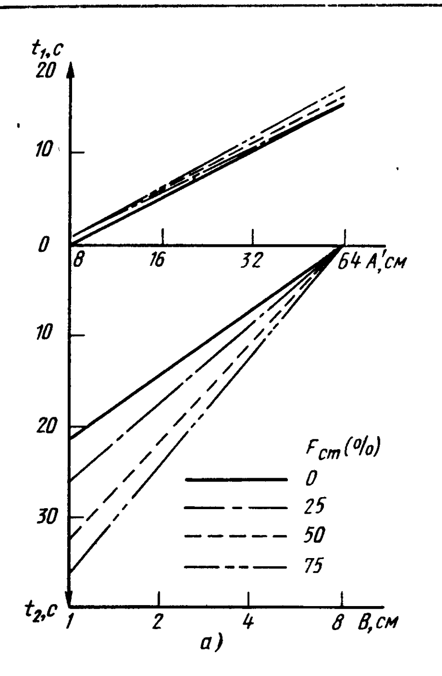
$$t = b_1 \log_2 A' - b_2 \log_2 B + t_0;$$

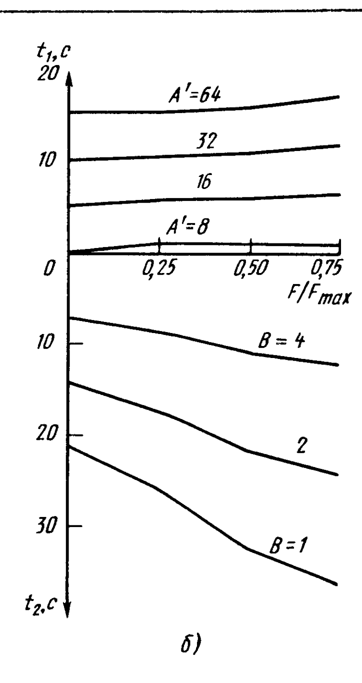
$$t_0 = a + b_1 + (b_2 - b_1) \log_2 W_0,$$

где t — время выполнения задания; $A' = A + B/2$; A — расстояние между центрами мишеней; B — ширина мишеней; a — время задержки реакции; b_1, b_2 — величины, обратные скорости передачи информации для подзаданий; W_0 — расстояние от начального положения до точки, разделяющей две части задания.

Велфорд предложил использовать в модели два различных процесса управления. Первый член в уравнении соответствует процессу управления простым перемещением. Управление точным перемещением описывается вторым членом, а третий член — постоянная величина, характеризующая задержку реакции. Применение информационного подхода к оценке манипулятора описано также у Хилла и МакГоверна [11].

Корреляция с данными экспериментов. В экспериментах для развязывания движения звеньев использовалось устройство управления с функцией передачи по каждо-





ис. 9.4. Графики регрессий для ряда значений трения качения:
а — простое t_1 и точное t_2 перемещения; б — форма представления для конструктора; F — сила трения

му перемещению (в отсутствие возмущающих воздействий) вида

$$\frac{w^2}{(s+w)^2}=\frac{\text{(отклонение исполнительного звена)}}{\text{(отклонение управляющего звена)}}.$$

В модели учитывался мертвый ход в обоих сочленениях задающего устройства. Максимальные значения угловой погрешности, вызванной мертвым ходом, были равны 0; 10,5; 21 и 31°. В модели предполагалось, что в сочленениях исполнительного устройства возникает трение, по величине эквивалентное 0, 25, 50 и 75 % от максимальной величины момента, создаваемого приводом звена. Величины перемещений принимали значения 8, 16, 32 и 64 см. Ширина мишени задавалась равной 1, 2 и 4 см.

Полученные данные обрабатывались по методике многофакторного регрессионного анализа. При составлении графиков регрессий время t было представлено в виде

$$t = t_1 + t_2,$$

где

$$t_1 = t_0 + (b_1 - b_2)\log_2 W + b_1 \log_2 \frac{A'}{W};$$

$$t_2 = b_2 \log_2 \frac{W}{B}.$$

Величина относительного перемещения $W = 8$ см выбиралась произвольно, но с расчетом, чтобы при любом значении B значение t было положительным. На рис. 9.3—9.4 изображены графики регрессий для времени t_1 и t_2 и для разных значений характеристик задания $\log_2 A'$ и $\log_2 B$. Величина общего времени равна расстоянию по вертикали между точками на графиках, соответствующих одному значению параметров задания. Например, зададимся значением собственной частоты 14 рад/с (см. рис. 9.4, а). Отложим по двум ординатным осям требуемые значения для A и B, например $A = 32$ см, $B = 2$ см. Значение t_1 соответствует проекции точки пересечения прямой $\omega = 14$ рад/с с кривой, соответствующей $A = 16$ см на ось t_1. Значение t_2 соответствует проекции точки пересечения прямой $\omega = 14$ рад/с с кривой $B = 2$ см на ось t_2. Тогда оценка общего времени для 30 повторений эксперимента равна $t_1 + t_2$.

С помощью зависимостей, приведенных на рис. 9.3, б, 9.4, б, 9.5, б, можно решить еще одну конструкторскую задачу. На этих графиках изображены зависимости времени t_1 и t_2 для различных значений характеристик манипулятора от собственной частоты трения качения и мертвого хода. Для каждой из кривых графика значения характеристик манипулятора постоянны. Эти графики можно использовать для оптимизации конструкции.

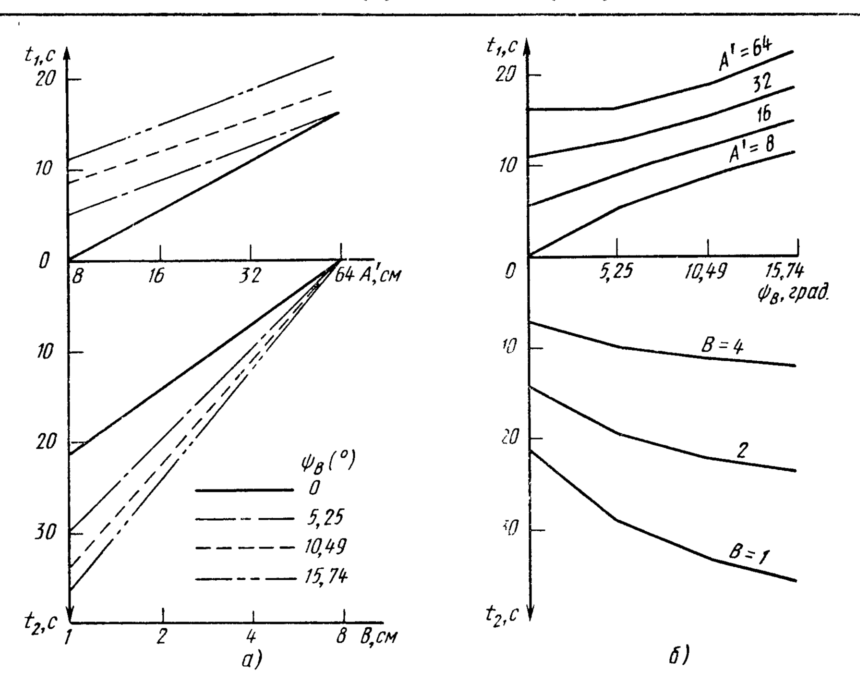


Рис. 9.5. Графики регрессии для ряда значений величины мертвого хода:
а — простое t_1 и точное t_2 перемещения; б — форма представления для конструктора; ψ — угол мертвого хода

Для других значений W графики имеют такой же наклон, но в другом интервале. Постоянная t_0 входит в величину t_1. W_{0e} оценивает величину отрезка при переходе от простого перемещения к сложному. Величина этой оценки и коэффициенты регрессии приведены в табл. 9.2.

9.2. Коэффициенты регрессии для характеристики манипулятора

Собственная частота, рад/с	Трение качения, %	Мертвый ход, градус	Коэффициенты регрессии			Коэффициент корреляции	Точка перехода
			b_1	b_2	t_0		
6	0	0	9,47	12,89	13,14	0,987	14,35
14	0	0	5,39	8,48	11,81	0,980	14,17
22	0	0	4,82	7,03	8,47	0,987	14,23
30	0	0	5,45	7,09	4,96	0,979	8,07
30	25	0	4,83	8,64	12,25	0,976	9,30
30	50	0	5,03	10,83	18,16	0,979	8,77
30	75	0	5,43	12,08	20,75	0,983	8,67
30	0	5,25	3,72	9,90	23,67	0,9[illegible]1	14,27
30	0	10,49	3,42	11,29	32,10	0,968	16,90
30	0	15,74	3,66	12,09	36,52	0,971	20,17

При изменении собственной частоты (см. рис. 9.4) соотношение между количеством информации b_1 и b_2 остается примерно постоянным, что отражает равную скорость передачи информации по модели Фиттса. При увеличении частоты ω свыше 30 рад/с, это соотношение меняется, что соответствует высказанным ранее соображениям.

Изменение величины трения качения (см. рис. 9.4) практически не влияет на время простого перемещения и величину W_{0e}, однако оказывает заметное влияние на время точного перемещения. Если моделируемая величина трения заметно уменьшает величину развиваемого приводом момента (как это и происходит в действительности), то влияние трения на продолжительность простого перемещения будет также значительным.

Продолжительность точного перемещения и его величина значительно возрастают при увеличении мертвого хода, так что создается впечатление, что управление производилось с погрешностями. Моделируемая величина мертвого хода очень велика, гораздо больше, чем это может быть в действительности. Более подробно этот вопрос освещен в работе Ханнема [12].

Ниже приводятся примеры использования экспериментальных данных при конструиро-

вании, но набор этих примеров далек от полноты.

Пример 1. На сколько увеличится продолжительность выполнения задания при замене рабочего органа ТУ на более тяжелый? При этом возрастает инерция манипулятора и собственная частота звена уменьшается с 22 до 14 рад/с. В задании используется перемещение на 32 см к мишени размером 2 см. По экспериментальным данным это увеличение составляет от 26 до 30 с. Конструктору следует учесть возможное возрастание продолжительности на 15 %.

Пример 2. На сколько уменьшится продолжительность короткого простого перемещения (8 см), выполняемого с точностью 1 см, при сокращении величины мертвого хода на 5°? По экспериментальным данным t_1 уменьшится с 5 с до 0, а время t_2 с 30 до 21 с, т. е. следует ожидать уменьшения общего времени примерно на 40 %.

Пример 3. Каким образом лучше повысить точность конструкции ТУ: повысить собственную частоту манипулятора сверх 30 рад/с или значительно снизить величину трения качения? При увеличении собственной частоты сверх 30 рад/с ожидается незначительное увеличение точности, тогда как уменьшение трения дает лучшие результаты.

Результаты при использовании нескольких пространственных ограничений. Применив к более сложным заданиям метод с использованием нескольких пространственных ограничений, можно определить коэффициент сложности и для таких заданий. Получены результаты для двух манипуляторов с различными характеристиками [13]. Общее время работы манипулятора складывается из времени подхода к цели, времени позиционирования и времени вставления. Зависящие от используемого количества ограничений продолжительности позиционирования и вставления определяются коэффициентом сложности, который равен сумме коэффициентов сложности по всем ограничениям в отдельности.

Важной особенностью проведенных экспериментов является то, что операции позиционирования и вставления могут состоять из одного, двух или трех этапов. Операция простого перемещения с управлением без обратной связи характеризуется достаточно малым (менее 5 бит) коэффициентом сложности. Коэффициент сложности от 5 до 10 бит соответствует точному перемещению. Характеристики точного перемещения влияют на продолжительность выполнения этой операции и на верхнее ограничение объема информации. Если заданная точность точного перемещения слишком высока для манипулятора, то может потребоваться

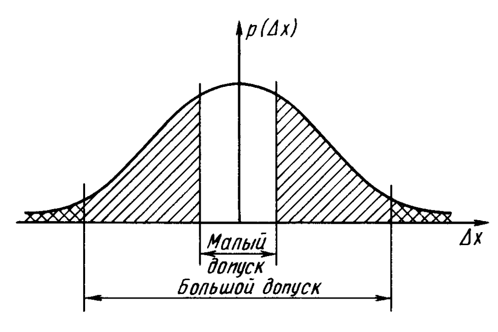


Рис. 9.6. Функция распределения вероятности позиционирования после завершения простого перемещения без обратной связи показывает количество неопределенности в положении. Для малого допуска требуется значительное снижение уровня неопределенности (заштрихованная область). Для большого допуска требуется малое снижение уровня неопределенности (перекрестно заштрихованная область)

выполнение третьего этапа. В процессе его выполнения рабочий орган совершает малые случайные перемещения относительно мишени. Вероятность успешного завершения задания постоянна на любом отрезке времени и зависит от дисперсии погрешности положения рабочего органа. Ограничение пропускной способности канала передачи информации оказывает влияние только на втором этапе. Неопределенность момента начала точного перемещения зависит от точности перемещения на первом этапе. Если в момент окончания перемещения, выполнявшегося при разомкнутом управлении, распределение положения рабочего органа будет подчиняться закону Гаусса с дисперсией s, то уменьшение неопределенности (рост объема информации, передаваемой на этапе точного перемещения) будет соответствовать отсеканию концов графика функции распределения Гаусса с соответствующим сужением интервала между координатами $\Delta x/2$ в положительном и отрицательном направлении от нуля. Графически это представлено на рис. 9.6. В заданиях, которые требуют повышенной точности исполнения, а также зависят от точности разомкнутого управления (выраженной через s), необходимо значительное снижение уровня неопределенности на этапе точного управления. При выполнении заданий с меньшей точностью такого снижения уровня неопределенности после завершения разомкнутого управления движением не требуется, и иногда можно даже совсем исключить стадию точного перемещения. Если $s/\Delta x >$ $> 0{,}5$, то количество переданной инфор-

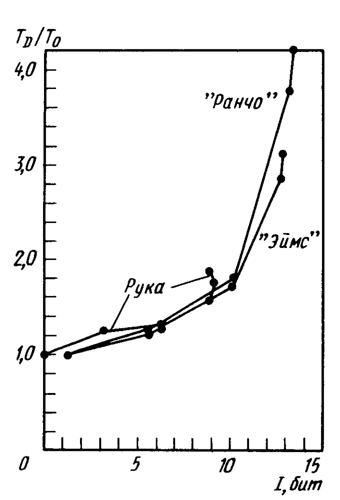


Рис. 9.7. Нормализованное время выполнения операции сборки при наличии ограничений на использование степеней подвижности:

T_0 — нулевые ограничения; T_D — сборка с ограничениями (индекс сложности установлен по простому перемещению без обратной связи)

мации примерно равно

$$H = 2{,}05 + \log_2 \frac{s}{\Delta x}.$$

Хилл использовал эту аппроксимацию при расчете коэффициента сложности на этапе точного перемещения. Пользуясь коэффициентом сложности и нормализованной относительно нуля степеней подвижности податливостью выполнения задания (преимущественно разомкнутое управление перемещением), он показал, что функционирование трех различных манипуляторов может быть аппроксимировано одной кривой (рис. 9.7). В экспериментах задание выполнялось вручную и использовались манипулятор «Эймс» (используемое в специализированном космическом оборудовании устройство с высокой точностью и малым мертвым ходом) и манипулятор «Ранчо» (существенно менее точное устройство).

9.4.2. Зависимость коэффициента временной эффективности от манипулятора и типа задания

В работе Верту [14] описывается несколько экспериментов, в которых:

использовались промышленные манипуляторы с несколькими степенями свободы. В результате не удалось разделить влияние отдельных характеристик манипулятора;

использовались двустороннее (с силовой обратной связью) и одностороннее копирующие управления, управление скоростью движения звена, управление приведенными скоростями перемещений и командное управление;

учитывались утомление оператора и продолжительность выполнения задания.

Верту представил результаты в форме значений коэффициента временной эффективности, т. е. по сравнению с продолжительностью выполнения задания вручную. Оценки коэффициента эффективности для манипуляторов шести типов приведены на рис. 9.8. Для обозначения типа, соответствующего перечисленным ранее классам манипулятора, введены следующие сокращения.

Маломощные с двусторонним копирующим управлением (*LD*).

Мощные с двусторонним копирующим управлением (*HD*).

С односторонним копирующим позиционным управлением (*PC*).

С управлением скоростью приведенных перемещений (*RMRC*).

С управлением скоростью (*RC*).

С командным управлением (*OOC*).

Рассматривались следующие типы заданий:

захват, перенос и отпускание (*PP*). Задача позиционирования, усложненная операциями захватывания и отпускания. Задание заключается в захватывании объекта и перемещении его в заданное положение;

простая сборка (*SA*). В задание входят операции перемещения и вставления (например, вставление стержня в отверстие);

обычная сборка (*NA*). Задание может включать в себя, например, операцию вставления с поворотом.

Из рис. 9.8 видно, какое влияние оказывают на продолжительность выполнения задания тип интерфейса человек — ТУ и относительная точность заданий. При изменении типа интерфейса величина коэффициента временной эффективности может изменяться более чем в 100 раз. И поскольку сравниваются сложные системы, это изменение нельзя объяснить только влиянием какой-либо одной характеристики.

МакГоверн тоже использовал для оценки производительности коэффициент временной эффективности. Полученные им результаты в первом приближении соответствуют приведенным на рис. 9.8. Кроме того, для операций позиционирования, не рассмотренных Верту, он выполнил разделение коэффициента временной эффективности по компонентам простого перемещения (на этапе движения к цели) и сложного перемещения (на этапе точного позиционирования). Он показал, что для ТУ рассмотренного им ти-

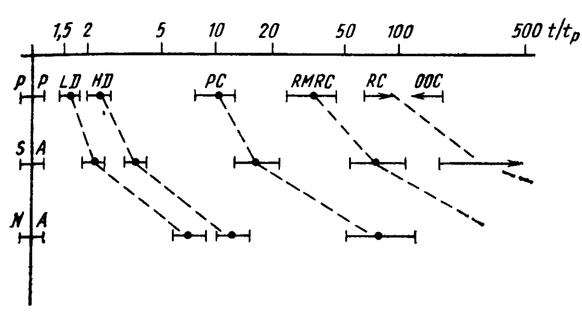


Рис. 9.8. Общая диаграмма значений коэффициентов временной эффективности

па (*PC*), эффективность на этапе движения к цели (1,25—1,5) гораздо выше, чем на этапе точного позиционирования (2,5—11). Зависимость эффективности от типа манипуляторов на этапе движения к цели слабее.

9.4.3. Продолжительность выполнения элементарных операций

Для реальных манипуляторов хорошие оценки позволяет получить метод суммирования продолжительностей элементарных операций. Результаты экспериментов [9] по определению времени выполнения элементарных операций в конкретной системе оператор — манипулятор использовались для оценки других заданий. Точность полученных оценок была в пределах 20 % от фактических значений. Такой большой разброс объясняется различием квалификации операторов и недостаточностью данных для корреляционного анализа.

Оценки выполнялись для двух манипуляторов: одного с копирующим управлением и силовой обратной связью и другого с односторонним копирующим управлением. Эксперименты проводились с манипулятором «Модель *H*» (первый манипулятор) с

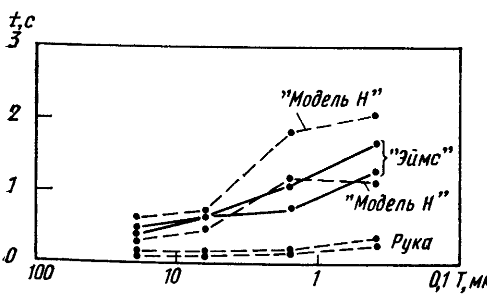


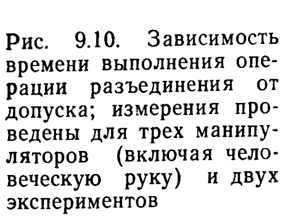
Рис. 9.9. Зависимость времени выполнения операции вставления от допуска; измерения проведены для трех манипуляторов (включая человеческую руку) и двух экспериментов

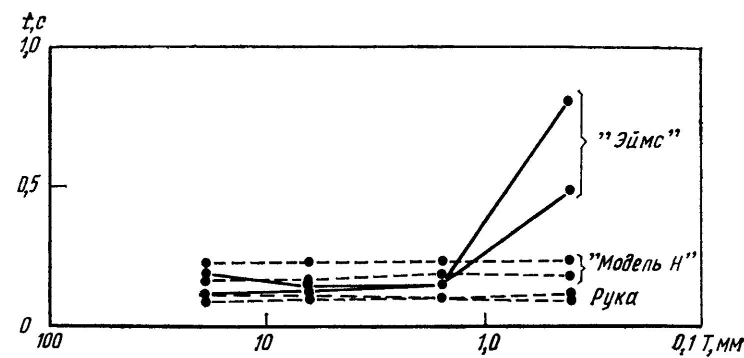
гибким приводным валом, установленным в фирме «Лоуренс Беркли лаборатори» и с манипулятором «Эймс» (второй манипулятор), установленным в Стэнфордском исследовательском институте. Оба манипулятора обладают высокой точностью и жесткостью и малым обратным ходом. Оператор располагался в двух метрах от манипулятора и визуально следил за выполнением задания. Полученные результаты представлены на рис. 9.9—9.14. И хотя объем полученных экспериментальных данных невелик, на их основе конструктор может сделать выводы о диапазонах изменения продолжительности выполнения операций в зависимости от их параметров. Операции без параметров перечислены в табл. 9.3.

Хилл [5] привел пример декомпозиции процесса поворачивания ручки переключателя на элементарные перемещения. Задание выполняется следующим образом: оператор касается панели (сигнал к началу выполнения задания), захватывает вертикальную ручку переключателя, поворачивает ее на 90° по часовой стрелке, затем на 180° против часовой стрелки и, наконец, снова на 90° по часовой стрелке, возвращая ручку в вертикальное положение. Ручка отпускается, и оператор вновь касается панели, что означает конец выполнения задания. Выделяются следующие элементарные перемещения (в скобках указываются параметры): касание; перемещение (250 мм); захват ручки; поворот (+90°); пауза; поворот (—180°); пауза; поворот (+90°); отпускание; перемещение (250 мм); установка.

9.3. Время выполнения операций без параметров

Манипулятор	Опыт		Опыт		Опыт	
	1	2	1	2	1	2
Рука человека	0,20	0,20	0,40	0,35	0,35	0,28
«Модель *H*»	2,56	3,04	1,92	1,88	0,40	0,83
«Эймс»	4,60	7,36	2,88	2,76	0,39	0,85


Рис. 9.10. Зависимость времени выполнения операции разъединения от допуска; измерения проведены для трех манипуляторов (включая человеческую руку) и двух экспериментов



Конструктор может использовать полученные результаты для оценки влияния таких характеристик манипулятора, как мертвый ход, трение и полоса пропускания, на продолжительность выполнения элементарных операций. Упоминавшаяся выше продолжительность перемещения в направлении мишени аналогична продолжительности элементарной операции перемещения, поэтому и влияние на них характеристик манипулятора будет одинаковым. Изменение продолжительности выполнения сложного перемещения аналогично изменению продолжительности выполнения операций установки и, кроме того, в первом приближении аналогично и другим операциям — точного позиционирования и сборки.

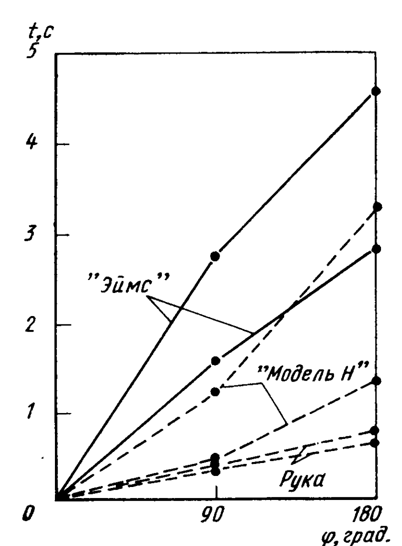


Рис. 9.11. Зависимость времени выполнения операции поворота от допуска; измерения проведены для трех манипуляторов (включая человеческую руку) и двух экспериментов

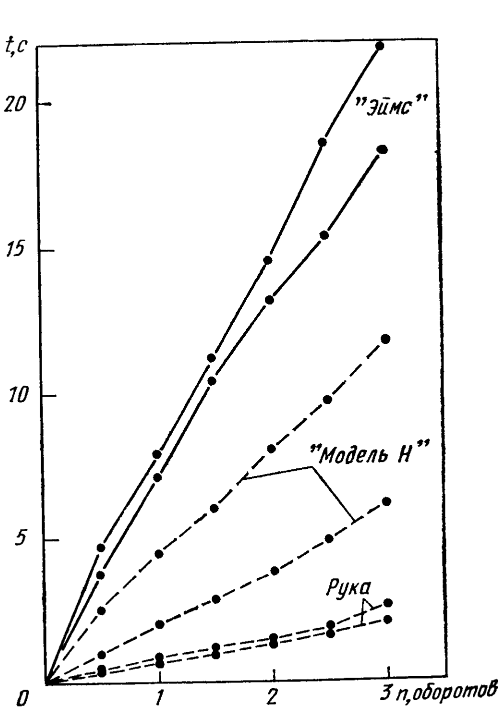


Рис. 9.12. Зависимость времени выполнения операции сгибания от допуска; измерения проведены для трех манипуляторов (включая человеческую руку) и двух экспериментов

9.5. Заключение

В настоящей главе были рассмотрены особенности проектирования манипулятора, предназначенного для использования в ре-

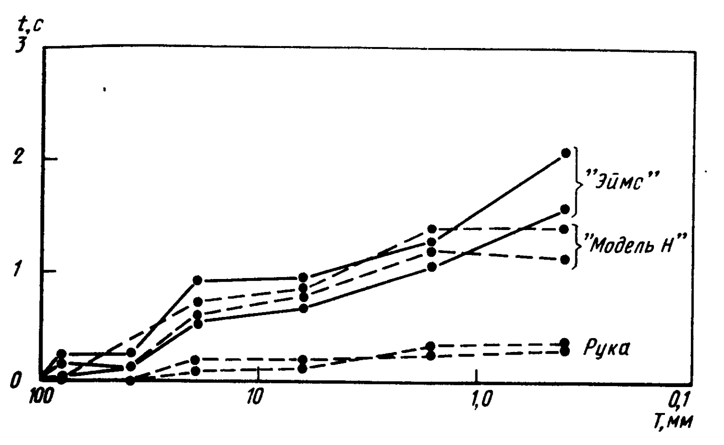


Рис. 9.13. Зависимость времени выполнения операции установки от допуска; измерения проведены для трех манипуляторов (включая человеческую руку) и двух экспериментов

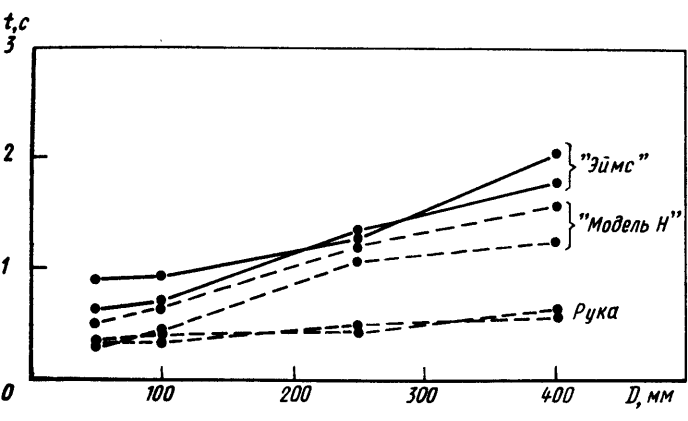


Рис. 9.14. Зависимость времени выполнения операции перемещения от допуска; измерения проводились для трех манипуляторов (включая человеческую руку) и двух экспериментов

жиме телеуправления. Приведена классификация интерфейсов человек — ТУ. Описываются три способа оценки производительности ТУ: по скорости передачи информации, по продолжительности выполнения задания по сравнению с его выполнением вручную и по продолжительности выполнения элементарных операций. Для принятия адекватных конструкторских решений необходима оценка производительности манипулятора с учетом специфики его применения. Приводятся и анализируются полученные результаты. Разработка универсальной методики проектирования ТУ потребует еще много усилий, хотя определенные успехи на этом направлении уже имеются, а полученные результаты могут использоваться при разработке новых ТУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Morgan, Clifford T., Chapanis, A., Cook, J. S., III, and Lund, M. W., Eds., *Human Engineering Guide to Equipment Design*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1963.
2. Sheridan, Thomas B., Ed., *Performance Evaluation of Robots and Manipulators*, U. S. Department of Commerce, National Bureau of Standards Special Publication 459, October 1976.
3. Fitts, P. M., The Information Capacity of Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement, *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 47, June 1954, pp. 381—391.
4. Book, Wayne J., and Hannema, Dirk, Master-Slave Manipulator Performance for Various Dynamic Characteristics and Positioning Task Parameters, *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, Vol. SMC-10, No. 11, November 1980, pp. 764—771.

5. McGovern, Douglas E., Factors Affecting Control Allocation for Augmented Remote Manipulation, Ph. D. Thesis, Stanford University, November 1974.
6. Hill, J. W. Study to Design and Develop Remote Manipulator Systems, Stanford Research Institute contract report on contract NAS2-8652, July 1976.
7. Taylor, F. W., *Scientific Management*, Harper and Brothers, New York, 1947.
8. Gilbreth, F. B., *Motion Study, a Method for Increasing the Efficiency of the Workman*, Van Nostrand, New York, 1911.
9. Hill, J. W., Study of Modeling and Evaluation of Remote Manipulation Tasks with Force Feedback, Final Report, SRI International Project 7696, March 1979.
10. Welford, A. T., Norris, A. H., and Schock, N. W., Speed and Accuracy of Movement and Their Changes with Age, *Acta Psychologica*, Vol. 30, 1969, pp. 3—15.
11. Hill, J. W., McGovern, D. E., and Sword, A. J., Study to Design and Develop Remote Manipulator Systems, final report, National Aeronautics and Space Administration contract NAS2-7507, SRI, 1974.
12. Hannema, Dirk P., Implementation and Performance Evaluation of a Computer Controlled Master Slave Manipulator with Variable Characteristics, M. S. Thesis, Georgia Institute of Technology, School of Mechanical Engineering, June 1979.
13. Hill, John W., and Matthews, Stephen J., Modeling a Manipulation Task of Variable Difficulty, Twelfth Annual Conference on Manual Control, University of Illinois, May 1976.
14. Vertut, J., Experience and Remarks on Manipulator Evaluation, in Sheridan, T. B., Ed., *Performance Evaluation of Programmable Robots and Manipulators*, U. S. Department of Commerce, NBS SP-459, October 1975, pp. 97—112.
15. Hill, J. W., Two Measures of Performance in a Peg-in-Hole Manipulation Task with Force Feedback, Thirteenth Annual Conference on Manual Control, Massachusetts Institute of Technology, June 1977.

Глава 10

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТА

Г. Варнеке, Р. Шрафт, М. Уоннер,
Институт промышленной автоматизации Фраунгофера
г. Штуттгарт, ФРГ

10.1. Введение

Для сравнения различных роботов необходимо уметь измерять их эксплуатационные характеристики. Введем следующие определения.

Определением пользовательских характеристик будем называть измерение показателей, влияющих на выполнение задания пользователя. Иначе эту процедуру можно называть объектно-ориентированным измерением характеристик.

Определением конструкторских характеристик будем называть измерение показателей, по которым выявляются недостатки конструкций и принимаются решения по модернизации робота и его системы управления, а также оцениваются возможности расширения области применения существующих роботов.

Определением характеристик в течение длительной эксплуатации будем называть измерение параметров, характеризующих изменения функциональной системы с течением времени.

К сожалению, процесс стандартизации технических характеристик промышленных роботов и способов их измерения протекает медленно. Это объясняется тем, что промышленные роботы находятся в начальной стадии своего развития.

10.2. Тестовый стенд для промышленных роботов

Чтобы восполнить этот пробел, в Институте промышленной автоматизации Фраунгофера [2] были разработаны тестовый стенд и стандартные процедуры измерения характеристик промышленных роботов. Важной особенностью конструкции тестового стенда является геометрическая совместимость робота и измерительного оборудования, что очень важно для выполнения измерений внутри рабочей зоны с заданной точностью.

На рис. 10.1 изображен тестовый стенд, состоящий из платформы и измерительной установки с тремя степенями подвижности,

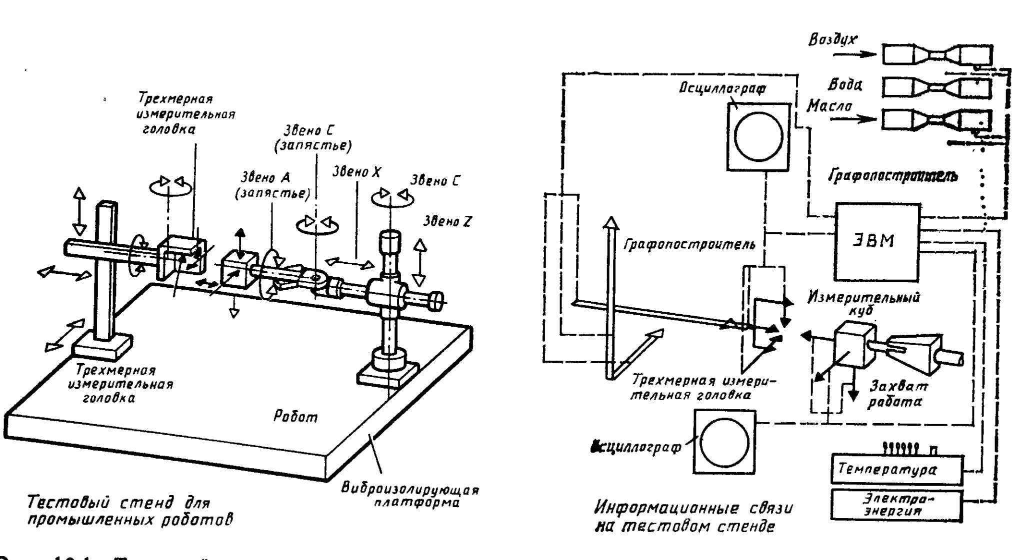


Рис. 10.1. Тестовый стенд для промышленных роботов

а также датчиков для измерения значений геометрических, силовых и температурных величин. С помощью такого стенда можно быстро получить интересную информацию, что обеспечивается соответствующими средствами обработки информации и программным обеспечением. Для измерений непосредственно в цехе могут быть использованы многоканальные магнитофоны с последующей обработкой информации на тестовом стенде.

10.3. Измерительные датчики

Для определения геометрических размеров используются контактные и неконтакт- е измерительные головки. Для статических измерений или для распознавания деталей в процессе роботизированной сборки применяются контактные датчики, оснащенные щупами с шариком. Из неконтактных датчиков наибольшее распространение получили ультразвуковые, лазерные и оптические; они формируют данные, удобные для обработки, обладают достаточно высокой разрешающей способностью и линейностью, широким рабочим диапазоном, и кроме то- , достаточно дешевы.

При выборе измерительной системы следует учитывать точность повторного позиционирования современных промышленных роботов. С помощью двух- и трехмерных измерительных головок удалось получить удовлетворительные результаты измерений расстояния до зафиксированного объекта.

Датчиками для измерения негеометрических величин являются термоэлементы, фотодиоды, фотоэлементы и акселерометры (пьезокерамические, пьезорезистивные и индукционные).

10.4. Измеряемые характеристики

Стенд позволяет измерять следующие технические характеристики промышленных роботов.

Геометрические характеристики: параметры рабочего пространства, статические параметры, позиционная точность (точность повторного позиционирования и реверсивная точность), точность отслеживания траектории, перерегулирование, воспроизведение элементарных перемещений, точность синхронного перемещения, стабильность работы.

Кинематические характеристики: длительность цикла управления, скорость, ускорение.

Энергетические и шумовые характеристики.

Температурные характеристики.

Динамические характеристики: усилия (захватывания, перемещения, программирования), динамическая упругость (частота, затухание, амплитуда, фаза), динамика движущейся системы, данные для моделирования и оптимизации.

10.4.1. Геометрические характеристики

Рабочее пространство. Рабочее пространство представляет собой геометрическое место положений центра присоединительного

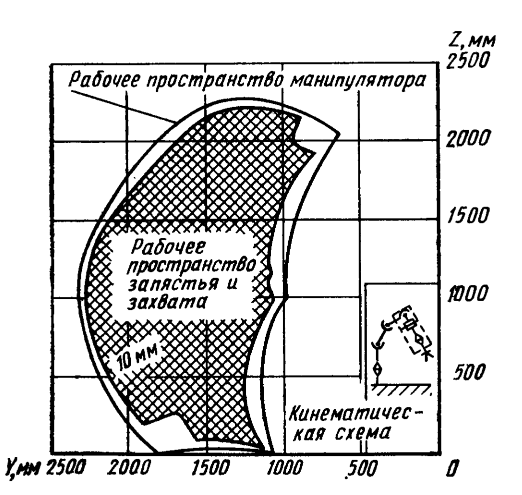


Рис. 10.2. Конфигурация рабочего пространства отдельно для манипулятора и для запястья с захватом

фланца манипулятора при всех возможных перемещениях осей подвижности. На стенде проверяются спецификации, указанные изготовителем.

А. Конфигурация рабочего пространства с четким выделением осей манипулятора, запястья и захвата. На рис. 10.2 изображены очертания рабочего пространства робота, занятого на окраске (отдельно для манипулятора и запястья с захватом).

Б. Часть рабочего пространства, не используемая из-за возможных столкновений осей.

В. Несовпадение рабочего пространства механической части и рабочего пространства устройства управления (неадекватность модели, ограниченная разрядность внутренних датчиков).

Статический режим. В статическом режиме определяется деформация манипулятора робота под воздействием различных нагрузок. Используются два измерительных метода.

А. Измерение деформаций в точке присоединения дает информацию о природе упругих деформаций рабочего органа манипулятора в целом.

Б. Измерения по отдельным осям.

Данные, полученные по этим методикам, используются для компенсации погрешностей устройства управления и поиска слабых мест в звеньях. Типовые результаты измерений приведены на рис. 10.3. В приведенном примере для последнего звена получена нелинейная характеристика, что говорит о неудачной конструкции.

Точность позиционирования. Под точностью позиционирования понимается точность повторного приведения рабочего органа в целевое положение при работе без нагрузки и при нормальной температуре. В европейских странах используются следующие характеристики.

А. Точность повторного позиционирования: среднее отклонение положения и ориентации в конце цикла после нескольких повторений (трехкратная стандартная погрешность отклонения $3s_y$) (рис. 10.4).

Б. Реверсивная погрешность: отклонение положения и ориентации при приходе в конечное положение несколько раз по различным траекториям (численное значение плюс или минус стандартное отклонение U (см. рис. 10.4)).

Метод измерения включает в себя следующие этапы.

А. Задание с помощью трехмерной измерительной установки и трехмерного неконтактного датчика точки в рабочей зоне с координатами X, Y, Z.

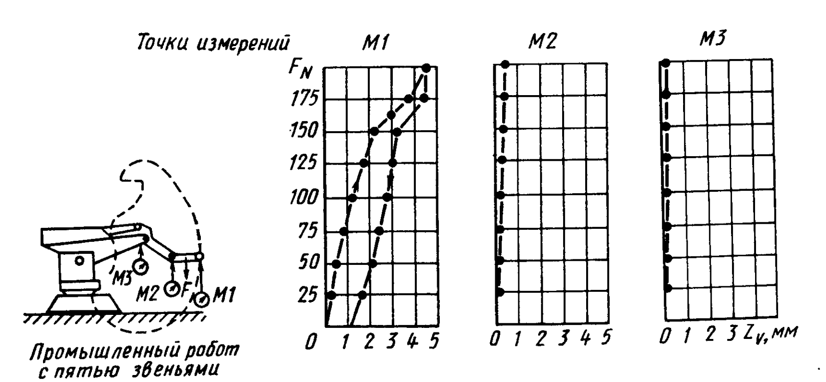


Рис. 10.3. Величина статических нагрузок на манипулятор в зависимости от положения его звеньев

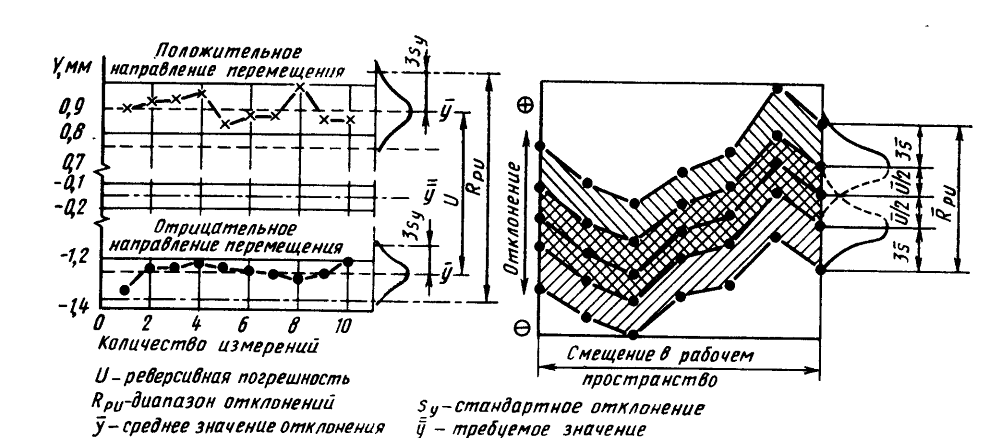


Рис. 10.4. Результаты измерений точности позиционирования промышленного робота

Б. Калибрование системы с помощью из-мерительного куба, присоединенного к кон-цу манипулятора. Уже это начальное поло-жение отрабатывается с некоторой погреш-ностью.

В. Задание тестового цикла с одинаковы-ми (для определения точности повторного позиционирования) и с разными (для опре-деления реверсивной погрешности) траекто-риями и с возвратом в начальное положе-ние.

Г. Измерение отклонений по осям X, Y, Z (и, если возможно, отклонений ориентации) при повторении цикла для одной точки не менее 10 раз.

Точность повторного позиционирования и реверсивная погрешность измеряются для роботов с цикловым и контурным управле-нием при выполнении заданий позициониро-вания. Обе погрешности зависят от того, в какой части рабочего пространства выпол-няются задания. Пользователю необходимо знать величину обеих погрешностей, по-скольку они влияют на точность как про-граммирования в режиме обучения, так и воспроизведения программы.

Точность отслеживания траектории. Точ-ность отслеживания траектории для робота с позиционным управлением определяется уровнем точности прохождения центра при-соединительного органа незагруженного ма-нипулятора по запрограммированной кри-вой. Обычно используются следующие ме-тоды измерений.

А. Фотометрия. Перемещение снимается двумя или более фотокамерами. Это точ-ный, универсальный метод, но обработка ре-зультатов очень сложна.

Б. Внешние измерения с помощью лазера [5]. Этот универсальный метод пока еще не дает удовлетворительной точности.

В. Измерения с помощью масштабной ли-нейки и индукционной измерительной систе-мы. Применение ограничено прямолинейным перемещением.

На последнем методе остановимся более подробно, потому что он широко распро-странен (недорогой, очень точный, данные представляются в удобной для последую-щей обработки форме, кроме того, боль-шинство заданий, выполняемых роботами с контурным управлением, состоят из прямо-линейных перемещений). В рабочем про-странстве устанавливается стальная линей-ка; начальная и конечная точки прямоли-нейного отрезка траектории задаются на определенном расстоянии между измери-тельной головкой (установленной на мани-пуляторе) и линейкой. Для определения точности прохождения траектории робот в автоматическом режиме проводит манипу-лятор между двумя этими точками. При этом можно измерить положение и ориен-тацию присоединительного фланца манипу-лятора относительно линейки. Измерения повторяются в различных зонах рабочего пространства при различных нагрузках и скоростях.

На рис. 10.5 приведены типовые резуль-таты определения погрешностей отслежива-ния траектории роботом:

А. Точность отслеживания траектории (средняя дисперсионная погрешность) об-условлена случайными отклонениями от прямой линии (усредненное отклонение рав-но 0). Дисперсионная погрешность опреде-ляется разностью между наибольшим и наименьшим отклонениями фактической траектории от прямой линии.

Б. Погрешность запаздывания (среднее отклонение от траектории) обусловлена па-раметрами цепи управления — привода, осу-

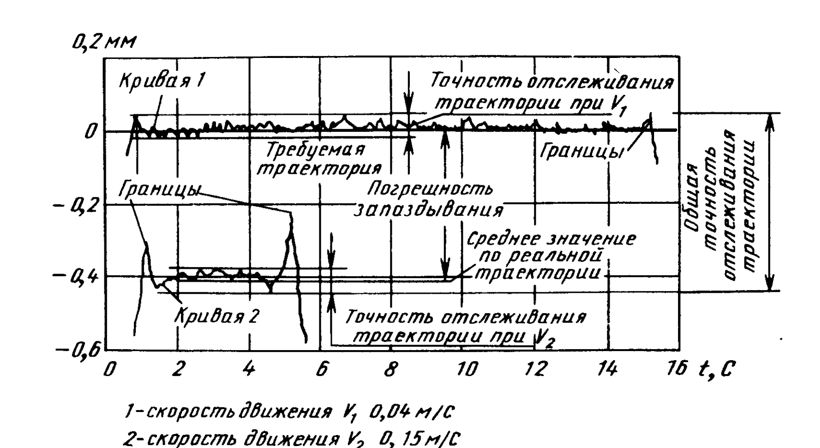


Рис. 10.5. Типовые результаты при определении погрешностей отслеживания траектории роботом

ществляющего движение оси робота по траектории. На графике это расстояние ме-жду аппроксимированной реальной траек-торией и заданной траекторией.

В. Перерегулирование при разгоне и тор-можении робота.

Все погрешности зависят от скорости, на-грузки и количества осей, обеспечивающих перемещение по траекториям в рабочем пространстве.

Перерегулирование. Перерегулирование возникает при сильных изменениях направ-ления движения или массы манипулятора, а также при разгоне и торможении. Изме-рения производятся путем введения мани-пулятором эталонного куба в зону действия неконтактной трехмерной измерительной го-ловки. Полученная информация запоминает-ся и вычисляются логарифмические прира-щения. Измерения необходимо повторить в различных частях рабочего пространства. Обычно пользователю достаточно знать максимальную амплитуду и продолжитель-ность перерегулирования, тогда как изгото-вителю важно знать все параметры перере-гулирования и факторы, влияющие на него.

На рис. 10.6 изображены графики пере-регулирования для робота, работающего в декартовых координатах. При снятии ха-рактеристик направление перемещения и на-грузка не изменялись. Процесс перерегули-рования представлен отдельно по коорди-натным осям.

Воспроизведение малых перемещений. При очень малых скоростях перемещения значительное влияние оказывает так назы-

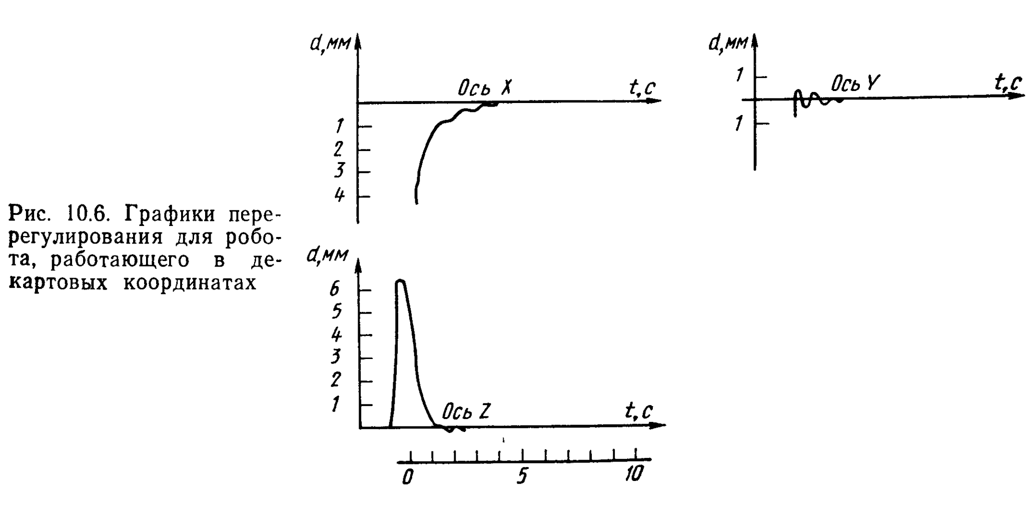


Рис. 10.6. Графики перерегулирования для робота, работающего в декартовых координатах

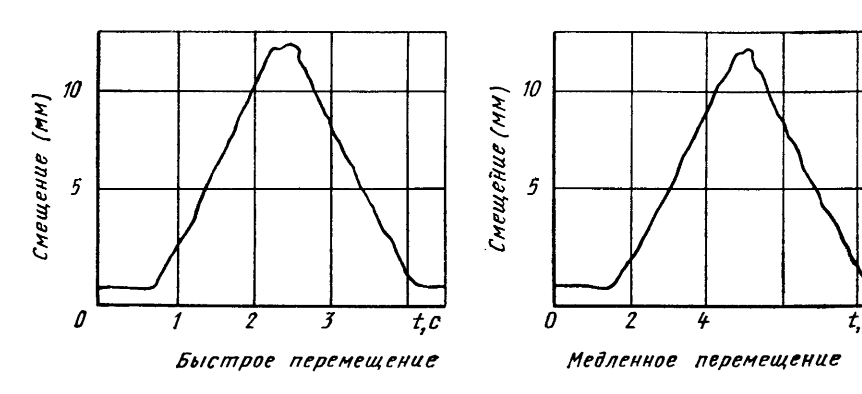


Рис. 10.7. Влияние эффекта залипания при различных скоростях перемещения

ваемый эффект залипания (преобразование трения покоя в трение скольжения). Компенсировать это явление очень сложно. Количественные измерения производятся так же, как и определение точности отслеживания траектории, либо (при очень малых перемещениях) с помощью датчика касания. Для роботов, выполняющих операции механообработки, полученные данные имеют значительную ценность. На рис. 10.7 приведены типовые графики поведения промышленных роботов под влиянием эффекта залипания.

Точность синхронных перемещений. В некоторых случаях при выполнении роботизированных операций требуется синхронизация действий робота с движением транспортера (например, при аэрозольной окраске или сборке). При этом большое значение имеет точность синхронизации перемещений. На рис. 10.8 изображена измерительная установка и приведены результаты измерений. Для проведения измерений на ленте перемещающегося с постоянной скоростью транспортера устанавливается измерительный куб. Робот должен сопровождать куб. Неконтактная измерительная головка устанавливается на манипуляторе робота. Производится измерение расстояния S_a.

Продолжительность стабилизации режима. Измерение продолжительности стабилизации режима заключается в определении продолжительности установления тепловых параметров. Эти характеристики особенно важны для гидравлических устройств. Измерения, состоящие из стандартных измерительных циклов, продолжаются не менее 4 ч. При измерениях должна соблюдаться стабильность следующих параметров: последовательности перемещений и их амплитуды, нагрузки, скорости и условий измерения.

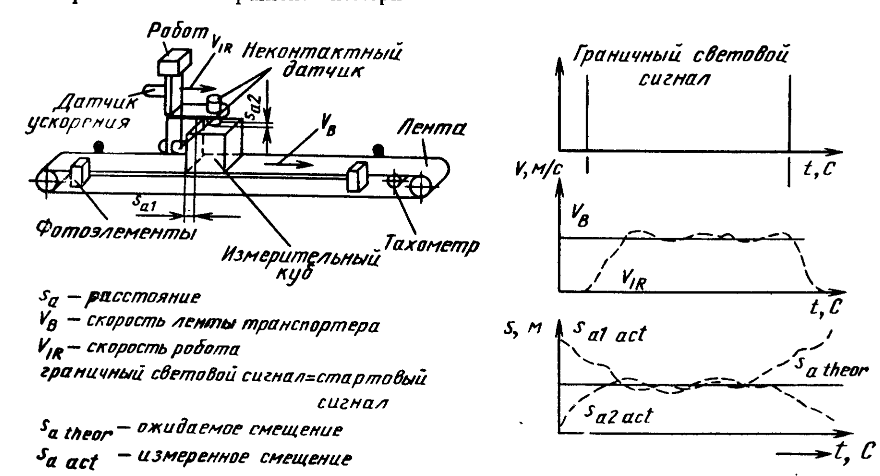


Рис. 10.8. Измерения точности синхронизации на транспортере (метод измерений и типовые результаты)

LABEL	FREQ	DAMPING	AMPLITUDE	PHASE	REF	RES	MODE	FLAGS
1	18.404	0.05132	1271	0.980	2Y+	1Y+	1	00011
2	20.192	0.05064	2858	-3.019	2Y+	1Y+	2	00011
4	32.578	0.01460	58.50	1.400	2Y+	1Y+	4	00011
5	36.471	0.08494	819.9	1.170	2Y+	1Y+	5	00011
6	72.636	0.00221	9540	3.060	2Y+	1Y+	6	00011
7	84.551	0.01253	147.4	1.295	2Y+	1Y+	7	00011

Рис. 10.9. Измерения по методу анализа режимов сборочного робота и типовые результаты

Поиск участков температурной нестабильности производится в различных точках. Возможно использование фотокамер инфракрасного диапазона.

10.4.2. Кинематические параметры

Измеряются следующие величины.

А. Длительность заданного цикла в различных участках рабочего пространства. Обычно изготовитель робота предоставляет информацию о скоростях и ускорениях по осям. Если робот имеет хотя бы одно вращательное звено, то направление скоростей перемещения по осям X, Y, Z должно быть связано с рабочим пространством.

Б. График скорости, максимальная и средняя скорости, полученные путем интегрирования значений ускорения. Знание формы графика ускорения позволяет усовершенствовать систему управления роботом. По величине максимального ускорения определяется захватывающее усилие; при вращении звеньев тангенциальные ускорения довольно часто принимают большие значения. Измерения производятся трехмерными измерительными приборами, снабженными индуктивными или пьезорезистивными акселерометрами. Кинематические параметры тесно связаны с динамическими параметрами.

10.4.3. Мощность и шумовые характеристики

Пиковые и номинальные значения мощности определяются в непрерывном рабочем режиме. Для пневматического робота, например, мощность определяет потребление рабочего тела, что, в свою очередь, определяет расходы на эксплуатацию.

Измерение звукового давления производится на расстоянии 1 м от рабочего пространства.

10.4.4. Температурные характеристики устройств и среды

Температурные колебания вызывают деформации частей манипулятора, что особенно важно при проектировании гидравлических устройств.

10.4.5. Динамические параметры

Измерений кинематических параметров, приведенных к центру присоединительного фланца, недостаточно. Иногда необходимо знать характеристики отдельных звеньев и манипулятора в целом. При проектировании робота активно используется метод анализа режимов. По этому методу на основании данных о силовых реакциях звеньев на управляющие воздействия определяется режим вибрации (без учета пространственного распределения массы и жесткости). Затем определяются частота, затухание и форма вибраций. В качестве примера приводятся данные измерений по этому методу вибраций сборочного робота (рис. 10.9).

Реакцию манипулятора можно разделить на следующие категории: дрожание (синусоидальное, случайное), удар (импульс), рывок (импульс), колебание (синусоидальное, случайное). По этим данным можно построить кинематическую модель, по которой затем определить пути совершенствования конструкции. Можно также воспользоваться данными, формируемыми внутренними датчиками и производить измерения непосредственно на манипуляторе робота. Оба эти метода применяются при измерениях в рабочем режиме при профилактическом обслуживании [7, 8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Warnecke, H. J. and Schraft, R. D., *Industrial Robots*, IFS-Publications Ltd., Bedford, 1982.
2. Brodbeck, B. and Schiele, G., *Prüfstand für Industrieroboter*, Forschungsbericht HA 80-032, Humanisierung des Arbeitslebens. Teil 8, Karlsruhe, 1980.
3. Brodbeck, B. and Schiele, G., *Ergebnisse von Messungen von Industrierobotern*, Technische Rundschau, January 1980, pp. 5—7.
4. VDI 2861, Blatt 1 and 2, Bezeichnungen und Kenngrößen von Handhabungseinrichtungen, VDI-Verlag.
5. Robot Check, Three-Dimensional Noncontact Dynamic Robot Measuring, *Selspine AB*, 1983.
6. SDRC/GENRAD, Modal-User Manual, March 1982.
7. Dagalakis, N., Analysis of Robot Performance Operation, *13th International Symposium on Industrial Robots*, Vol. 1, 1983, pp. 7.73—7.95.
8. Warnecke, H. J., Schraft, R. D., and Wanner, M. C., Application of the Experimental Modalanalysis in the Performance Testing Procedure of Industrial Robots, *Proceedings of Robotics Europe Conference*, 1984.

Часть 3
УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОМ

Глава 11
ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ РОБОТАМИ

Дж. Й. С. Лу, университет Пэрдью, г. Вест Лафайетт, шт. Индиана

11.1. Управление роботами

Промышленные роботы представляют собой механические манипуляторы с управлением от ЭВМ, используемые на производстве. Число звеньев у серийных промышленных роботов колеблется от трех до семи. Обычно манипулятор состоит из шести звеньев (что соответствует шести степеням подвижности) и рабочего органа. Позиционное управление каждым из звеньев робота осуществляется замкнутой системой сервоуправления [1].

Действия робота удобнее всего описывать положением его рабочего органа в декартовых координатах. Обратная связь осуществляется по измеряемым смещению и скорости перемещения звена. Таким образом, целевое положение рабочего органа и измеряемые параметры обратной связи задаются в различных системах координат (табл. 11.1). Следовательно, управление положением и ориентацией рабочего органа с помощью приводов звеньев требует соответствующего преобразования координат. Преобразование, однако, может не понадобиться, если использовать процедуру «обучения показом» (случай 1, табл. 11.1). Для выполнения этой процедуры рабочий орган манипулятора проводится оператором через множество точек, принадлежащих заданной в декартовом пространстве траектории, по которой должен двигаться рабочий орган. Таким образом, робот рассматривается как аналоговое устройство, в котором при выполнении процедуры «обучения показом» множество точек, заданных в декартовых координатах, преобразуется в множество точек, заданных в координатах звеньев. Совокупность точек, заданных в координатах звеньев, определяет соответствующие траектории звеньев и используется как опорные точки в устройствах замкнутого позиционного управления каждого звена. Следовательно, сервоуправление осуществляется в координатах звеньев, хотя конечной целью управления являются положение и ориентация рабочего органа, заданные в декартовых координатах.

В некоторых случаях процедура «обучения показом» не используется (например, если рабочий орган робота слишком массивен и громоздок или если заданная в декартовом пространстве траектория рабочего органа генерируется ЭВМ и передается непосредственно в устройство управления). В таких случаях избежать преобразования координат невозможно. Для определения преобразования рассмотрим рабочий орган в декартовой системе координат. Его расположение характеризуется позицией, описываемой позиционным вектором $\mathbf{p}(t)$, и ориентацией, описываемой тремя ортонормированными векторами $\mathbf{n}(t)$, $\mathbf{s}(t)$ и $\mathbf{a}(t)$, называемыми соответственно единичная нормаль, единичный радиус кривизны, единичная касательная. Эти векторы заданы в базовой системе координат (рис. 11.1, *а*). Таким образом, положение рабочего органа в декартовой системе координат в момент

11.1. Известные и неизвестные параметры в различных системах координат

	Декартовы координаты	Координаты звеньев
Заданные значения положения и ориентации	Случай 1. Обучение показом Известно ⟶ Случай 2. $f^{-1}[p(t),\ \theta(t)]$ Случай 4. Аппроксимирующие функции	
Измеренные значения смещений и скоростей	Случай 3. $f(q_1,\ q_2,\ \ldots,\ q_n)$ ⟵	Известно
Устройство управления	Уровень запястья	Уровень звена

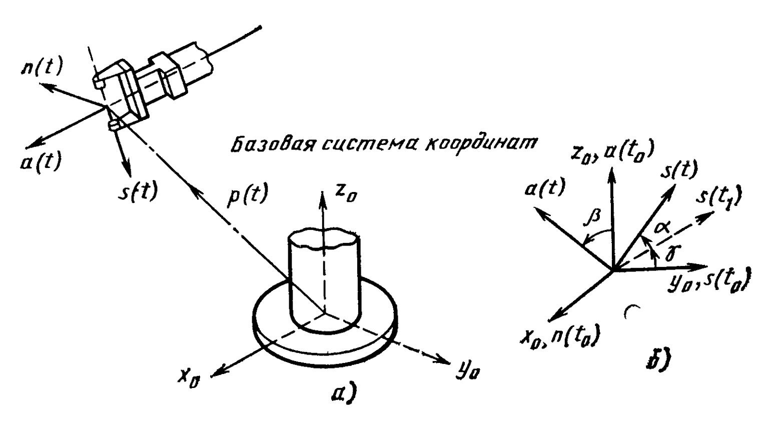


Рис. 11.1. Векторы положения и ориентации запястья (*а*) и углы Эйлера, задающие ориентацию (*б*)

времени t может быть задано матрицей размером 4 × 4:

$$\mathbf{H}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{n}(t) & \mathbf{s}(t) & \mathbf{a}(t) & \mathbf{p}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (11.1)$$

Последняя строка в $\mathbf{H}(t)$ добавлена для удобства вычислений с использованием однородного преобразования матриц [2], подробно рассматриваемого в разд. 11.4.3, посвященному устройству многозвенного управления. Ориентация также может быть определена значениями эйлеровских углов, заданных в базовой системе координат. Пусть в начальный момент времени $t = t_0$ векторы $\mathbf{n}(t_0)$, $\mathbf{s}(t_0)$ и $\mathbf{a}(t_0)$ равны соответственно $\mathbf{x}_0$, $\mathbf{y}_0$ и $\mathbf{z}_0$, как это показано на рис. 11.16. Любая ориентация $[\mathbf{n}(t),\ \mathbf{s}(t),\ \mathbf{a}(t)]$ может быть достигнута поворотом на угол γ радиан вокруг оси $\mathbf{z}_0$, так, чтобы вектор $\mathbf{s}(t_0)$ совпал с вектором $\mathbf{s}(t_1)$; затем поворотом на угол β радиан вокруг оси $\mathbf{s}(t_1)$, так, чтобы вектор $\mathbf{a}(t_0)$ совпал с вектором $\mathbf{a}(t_1)$ и, наконец, поворотом на угол α радиан вокруг оси $\mathbf{a}(t)$ до совпадения с векторами $\mathbf{n}(t)$ и $\mathbf{s}(t)$. Это равносильно повороту системы координат $[n(t_0),\ s(t_0),\ \mathbf{a}(t_0)]$, которая в начале совпадает с $[\mathbf{x}_0,\ \mathbf{y}_0,\ \mathbf{z}_0]$ на угол α радиан вокруг z_0, затем на угол β радиан вокруг y_0 и, наконец, на угол γ радиан снова вокруг z_0. Таким образом получаем следующие соотношения:

$$\mathbf{n}(t) = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta\cos\gamma - \sin\alpha\sin\gamma \\ \cos\alpha\cos\beta\sin\gamma + \sin\alpha\cos\gamma \\ -\cos\alpha\sin\beta \end{bmatrix}; \quad (11.2)$$

$$\mathbf{s}(t) = \begin{bmatrix} -\sin\alpha\cos\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma \\ -\sin\alpha\cos\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma \\ \sin\alpha\sin\beta \end{bmatrix}; \quad (11.3)$$

$$\mathbf{a}(t) = \begin{bmatrix} \sin\beta\cos\gamma \\ \sin\beta\sin\gamma \\ \cos\beta \end{bmatrix}. \quad (11.4)$$

Следовательно, положение рабочего органа в момент времени t в декартовой системе координат может быть описано шестимерным вектором $[\mathbf{p}(t)'\boldsymbol{\theta}(t)']$, где $[\boldsymbol{\theta}(t)'] = [\alpha,\ \beta,\ \gamma]$, а $\mathbf{p}(t)'$ — транспонированный вектор $\mathbf{p}(t)$.

Однако рабочий орган перемещается с помощью приводов звеньев. Если все смещения звеньев известны, то можно определить положение и ориентацию рабочего органа. Пусть число звеньев равно n. Пусть q_i для $i = 1, 2, \ldots, n$ — смещение i-го звена от соответствующей контрольной точки. Тогда для любого произвольно взятого робота с известными геометрическими характеристиками существует соотношение

$$[\mathbf{p}(t)'\boldsymbol{\theta}(t)']' = \mathbf{f}[q_1,\ q_2,\ \ldots,\ q_n], \quad (11.5)$$

где $\mathbf{f}(\cdot)$ — векторная функция от шестимерных векторных переменных. Эта функция почти всегда нелинейна, что усложняет задачу [3]. На практике чаще задаются декартовые координаты $[\mathbf{p}(t)'\boldsymbol{\theta}(t)']$, а требуется определить соответствующие смещения в параметрах звеньев, т. е. заставить приводы звеньев перевести манипулятор в положение, заданное в декартовых координатах. Решение этой задачи требует знания

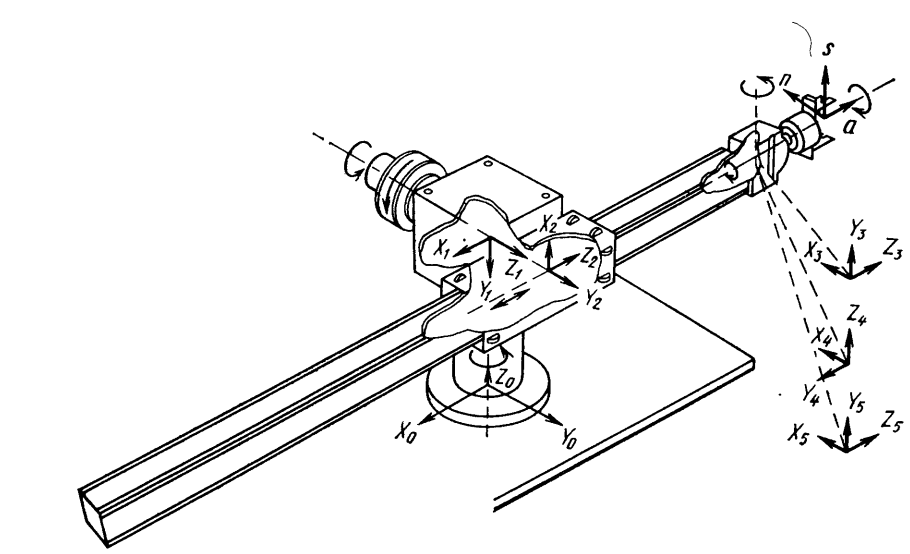


Рис. 11.2. Манипулятор Стэнфордского университета

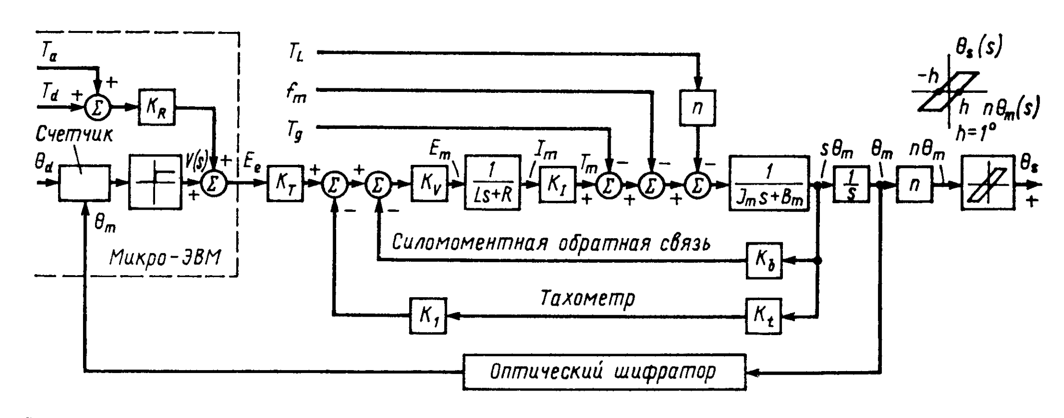


Рис. 11.3. Блок-схема системы позиционного управления

обратной векторной функции n переменных $\mathbf{f}^{-1}(\cdot)$. Эта функция, если она существует, может оказаться не единственной. Для серийных промышленных роботов число n обычно равно 5 или 6. Геометрическая конфигурация этих роботов, описанная ненулевыми определителями и соответствующими рангами q_i позволяет найти единственное решение уравнения (11.5) [3].

Зная преобразование между позицией и ориентацией в декартовой системе координат и в системе координат, связанной со звеньями, становится возможным управлять движением рабочего органа по заданной в декартовом пространстве траектории в параметрах положения звеньев. Это характеризует управление на уровне звеньев (случай 2, см. табл. 11.1). В качестве примера рассмотрим манипулятор, разработанный в Стэнфордском университете, имеющий одно призматическое и шесть вращательных звеньев (рис. 11.2). Блок-схема управления звеньями манипулятора, снабженного приводами на двигателях с постоянными магнитами, показана на рис. 11.3. Он имеет оптический шифратор в цепи позиционной обратной связи и обратную связь через тахометр для учета трения. Поскольку промышленный робот снабжен системами позиционного управления каждого звена, он является позиционным устройством. Теперь поставим вопрос: как, управляя звеньями,

достичь заданного положения? Прежде чем дать на него ответ, надо уточнить следующие возможные условия. Должен ли рабочий орган проследовать по заданному пути? Если ответ отрицательный, тогда мы имеем дело с простой задачей поточечного позиционного управления. В противном случае устройство управления должно отслеживать движение по заданной траектории. Эти две задачи анализируются в последующих разделах.

11.2. Позиционное управление одним звеном

Если траектория не задана, то устройству управления достаточно обеспечить прохождение рабочего органа через все заданные опорные точки. На вход системы управления подаются декартовы координаты опорных точек, которые могут быть введены в систему в цифровом виде (случай 1), либо получены посредством так называемого обучения показом (случай 2) (т. е. координаты опорных точек записываются, когда рабочий орган робота проводится через них оператором вручную). Затем производится преобразование координат, в результате чего с использованием функции $\mathbf{f}^{-1}(\cdot)$ вычисляются соответствующие параметры звеньев $[q_1, \ldots, q_n]$ в заданных опорных точках декартовой системы координат цифровым (для случая 1) или аналоговым (для случая 2) способом, а затем осуществляется поточечное позиционное управление роботом по параметрам звеньев. На практике для каждого звена используется позиционное сервоуправление. Вначале предположим, что все звенья управляются независимо. Тогда любое устройство управления звеном представляется достаточно простым. В действительности, силовые взаимодействия между звеньями в движении создают связи, усложняющие систему управления. Обсуждение этих вопросов проводится в последующих разделах.

11.2.1. Устройство управления звеном

В дальнейшем будем считать, что робот имеет механически жесткую структуру. На рис. 11.4 схематически изображено устройство звена с приводом, где

J_a — инерция привода звена, г·м·с²/рад;
J_m — постоянная инерция звена манипулятора (робота) со стороны привода;
J_l — инерция тяги манипулятора;
B_m — коэффициент затухания привода, г·м·с/рад;
B_l — коэффициент затухания нагрузки;
f_m — среднее трение вращения;
τ_g — момент, обусловленный влиянием силы тяжести (гм);
τ_m — момент на валу привода;
τ_l — момент, создаваемый нагрузкой;
θ_m — угловое смещение вала привода, рад;
θ_s — угловое смещение нагрузки.

Пусть N_m, N_s — число зубьев шестерней передачи соответственно вала привода и вала нагрузки; r_m и r_s — соответственно модули шестерней передачи вала привода и вала нагрузки; тогда коэффициент передачи

$$n = \frac{r_m}{r_s} = \frac{N_m}{N_s} \leqslant 1 \qquad (11.6)$$

и, следовательно,

$$\theta_s = n\theta_m. \qquad (11.7)$$

Используя правило Д'Аламбера, получаем:

$$\tau_l - B_l\dot{\theta}_s = J_l\ddot{\theta}_s. \qquad (11.8)$$

Применяя то же правило к передаче привода, получаем:

$$\tau_m - n\tau_l - B_m\dot{\theta}_m = (J_a + J_m)\ddot{\theta}_m. \qquad (11.9)$$

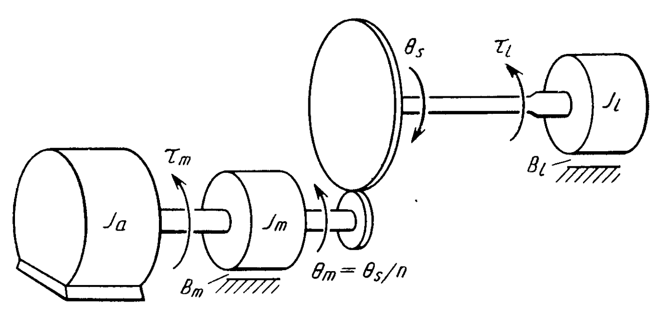


Рис. 11.4. Схема узла привод — передача — нагрузка одного звена

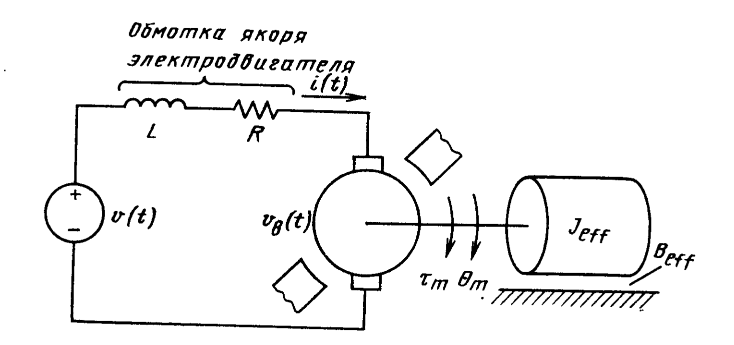


Рис. 11.5. Схема электромеханического привода

Сопоставляя соотношения (11.7), (11.8) и (11.9), получаем:

$$\tau_m = (J_a + J_m + n^2J_l)\ddot{\theta}_m + (B_m + n^2B_l)\dot{\theta}_m, \qquad (11.10)$$

где $J_{eff} = (J_a + J_m + n^2J_l)$ — эффективная инерция, а $B_{eff} = (B_m + n^2B_l)$ — эффективный коэффициент затухания вала привода.

В промышленных роботах используются гидравлические, пневматические или электрические приводы. Например, манипуляторы ПУМА фирмы «Юнимэйшн» и манипуляторы Стэнфордского университета снабжены электрическими приводами на двигателях постоянного тока с постоянными магнитами. Управление ими осуществляется через якорь двигателя. Их схема приведена на рис. 11.5. На этом рисунке $v_b(t)$ — наведенная ЭДС обмотки якоря (В), которая может быть представлена соотношением

$$v_b(t) = K_b\dot{\theta}_m(t), \qquad (11.11)$$

где K_b — постоянная наведенной ЭДС, В·с/рад. Пусть L и R — соответственно индуктивность (Гн) и сопротивление (Ом) обмотки якоря двигателя. Так как величина L порядка десятых долей мГн, то ею можно пренебречь. Тогда, используя правило Кирхгоффа для напряжений в цепи якоря, можно получить следующие зависимости от частоты вращения:

$$V(s) - K_bs\Theta_m(s) = (Ls + R)I(s) \cong \cong RI(s), \qquad (11.12)$$

где s — комплексная частота вращения, рад/с. Работа двигателя постоянного тока описывается линейной частью выражения, поэтому генерируемый момент вращения пропорционален силе тока в цепи якоря. Тогда получаем следующую зависимость от частоты вращения:

$$T_m(s) = K_lI(s), \qquad (11.13)$$

где K_l — постоянная момента, (г·м)/А. Вал двигателя механически соединен с системой привод — передача — нагрузка с эффективной инерцией J_{eff} и эффективным коэффициентом затухания B_{eff} вала привода (см. рис. 11.5). Связи механических компонентов описываются соотношениями (11.10), применяя к которому преобразование Лапласа, получаем

$$T_m(s) = (J_{eff}s^2 + B_{eff}s)\Theta_m(s). \qquad (11.14)$$

Подставляя $T_m(s)$ и $I(s)$ из соотношений (11.12), (11.13) и (11.14), получаем:

$$\frac{\Theta_m(s)}{V(s)} = \frac{K_I}{s[RJ_{eff}s + (RB_{eff} + K_IK_b)]}, \qquad (11.15)$$

что представляет собой функцию преобразования или зависимость возрастания углового смещения вала двигателя на выходе от приложенного к двигателю постоянного тока напряжения на входе.

Чтобы построить устройство позиционного управления для угловых смещений вала нагрузки, необходимо преобразовать это смещение в электрическое напряжение двигателя постоянного тока. Для устройств управления с обратной связью (замкнутых) возбуждающий сигнал представляет собой разность между желаемым и действительным смещениями в момент времени t:

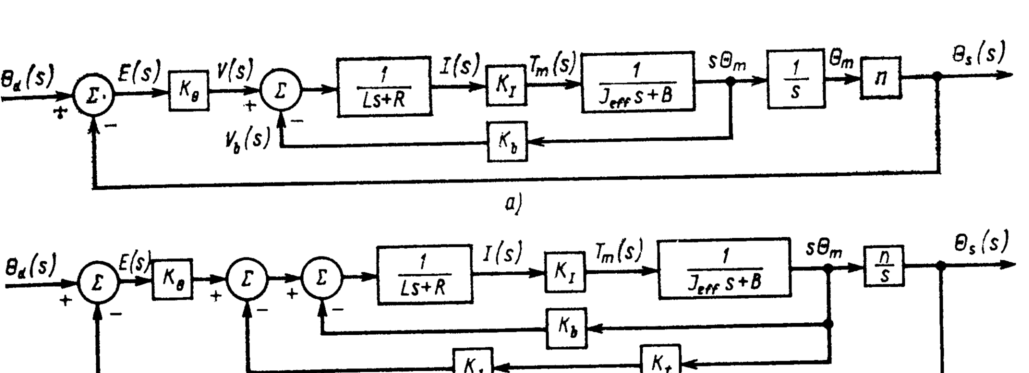
$$e(t) = \theta_d(t) - \theta_s(t). \qquad (11.16)$$

Эта разность смещений преобразуется в напряжение с помощью включенных в цепь потенциометра или оптического шифратора — счетчика следующим образом:

$$v(t) = K_\theta e(t) \qquad (11.17)$$

или в преобразованном виде:

$$V(s) = K_\theta E(s) = K_\theta[\Theta_d(s) - \Theta_s(s)], \qquad (11.18)$$



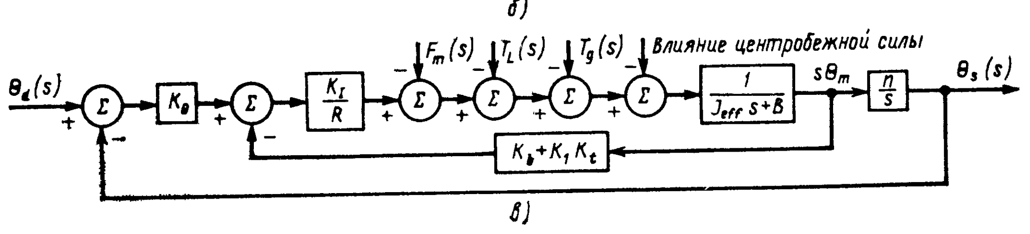


Рис. 11.6. Блок-схема устройства позиционного управления

где K_θ — постоянная преобразования, В/рад. Соединив все физические устройства, можно построить блок-схему, подобную приведенной на рис. 11.6, *а*. Функция преобразования прямой (разомкнутой) цепи имеет вид:

$$\frac{\Theta_s(s)}{E(s)} = \frac{nK_\theta K_I}{s\left[RJ_{eff}s + (RB_{eff} + K_I K_b)\right]}, \qquad (11.19)$$

что либо видно из блок-схемы на рис. 11.7, *а*, либо получается из соотношений (11.15), (11.18) и равенства $\Theta_s(S) = n\Theta_m(S)$.

Для уменьшения времени регулирования по цепи обратной связи через тахометр передается сигнал о скорости вращения вала двигателя (вычисленная разность угловых смещений вала за фиксированный промежуток времени). Блок-схема получившегося в результате устройства управления показана на рис. 11.6, *в*, где K_t — постоянная тахометра, (В·с)/рад, K_1 — коэффициент усиления, В/В. Так как напряжение обратной связи в цепи якоря двигателя теперь равно $K_b\dot{\theta}_m(t) + K_1K_t\dot{\theta}_m(t)$ вместо $K_b\theta_m(t)$, то преобразование Лапласа (11.12) в цепи принимает вид:

$$V(s) - (K_b + K_1K_t)s\Theta_m(s) = RI(s). \qquad (11.20)$$

Таким образом, скорректированные разомкнутая и замкнутая функции преобразования могут быть получены простой заменой K_b на $(K_b + K_1K_t)$ в соотношении (11.19). Следовательно,

$$\frac{\Theta_s(s)}{E(s)} = \frac{nK_\theta K_I}{RJ_{eff}s^2 + [RB_{eff} + K_I(K_b + K_1K_t)]\,s}; \qquad (11.21)$$

$$\frac{\Theta_s(s)}{\Theta_d(s)} = \frac{nK_\theta K_I}{RJ_{eff}s^2 + [RB_{eff} + K_I(K_b + K_1K_t)]\,s + nK_\theta K_I}. \qquad (11.22)$$

Для конкретного робота числовые значения параметров n, K_I, K_t, K_b, R, J_{eff} и B_{eff} либо заданы (изготовителем узлов), либо определяются экспериментально. Например, в состав звеньев 1 и 2 манипулятора Стэнфордского института входят соответственно двигатели постоянного тока *U9M4T* и *U12M4T* и интегральный тахометр 030/105 фирмы «Фотосэкитс». Значения параметров узла двигатель — тахометр приведены в табл. 11.2 [5]. В предпоследней строке табл. 11.2 приведены значения среднего момента трения вращения, который присутствует в любом узле и должен быть преодолен. Эффективная инерция всех звеньев манипулятора, разработанного в лаборатории исследования реактивного движения Стэнфордского университета, приведена в табл. 11.3 [6].

11.2. Основные параметры узла электродвигатель — тахометр

Модель	*U9M4T*	*U12M4T*
K_I (Н·м/А)	0,043	0,098
J_a (Н·м·с²/рад)	$0{,}056 \cdot 10^{-3}$	$0{,}233 \cdot 10^{-3}$
B_m (Н·м·с/рад)	$0{,}08 \cdot 10^{-3}$	$0{,}30 \cdot 10^{-3}$
K_b (В·с/рад)	0,04297	0,10123
L (Гн)	100,0	100,0
R (Ом)	1,025	0,91
K_t (В·с/рад)	0,0149	0,05062
f_m (Н·м)	0,042	0,042
n	0,01	0,01

11.3. Эффективная инерция манипулятора Стэнфордского университета

Номер звена	Минимальное значение без нагрузки, кг·м²	Максимальное значение без нагрузки, кг·м²	Максимальное значение с полной нагрузкой, кг·м²
1	1,417	6,176	9,570
2	3,590	6,950	10,300
3	7,257	7,257	9,057
4	0,108	0,123	0,234
5	0,114	0,114	0,225
6	0,040	0,040	0,040

Следует отметить, что постоянная преобразования K_θ и коэффициент усиления K_1 должны быть определены через параметры, связанные с собственной частотой резонанса и коэффициента затухания в узлах робота (см. ниже).

Как отмечалось ранее, средний момент трения вращения узла двигатель — тахометр должен преодолеваться двигателем. Также за счет двигателя должны быть скомпенсированы момент вращения, создаваемый внешней нагрузкой τ_L, моменты вращения силы тяжести τ_g и центробежной силы $\tau_c(t)$. Этими значениями определяется влияние физических сил на робота. Они изображены на блок-схеме устройства позиционного управления (рис. 11.6, *б*) после блока генерации момента вращения двигателем. На рис. 11.6, *в* изображена скорректированная блок-схема устройства позиционного управления, где переменные $F_m(s)$, $T_L(s)$ и $T_g(s)$ получены соответственно из f_m, τ_L и τ_g в результате применения преобразования Лапласа. Член, учитывающий воздействие центробежной силы, является функцией от $[\theta_s(t)]^2$, которую преобразование Лапласа приводит к интегралу свертки. Так как математическая модель системы управления линейна, применяем принцип суперпозиции. Влияние центробежной силы будет рассмотрено ниже.

11.2.2. Определение K_θ и K_1

Из соотношения (11.22) получаем характеристическое уравнение для системы замкнутого управления

$$s^2 + \frac{[RB_{eff} + K_I(K_b + K_1K_t)]\,s}{(RJ_{eff})} + \frac{nK_\theta K_I}{RJ_{eff}} = 0, \qquad (11.23)$$

которое обычно записывается в виде:

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0, \qquad (11.24)$$

где ζ — коэффициент затухания; ω_n — собственная частота вращения (без учета затухания). Из уравнений (11.23) и (11.24) получаем:

$$\omega_n = \sqrt{nK_\theta K_I/(RJ_{eff})} > 0 \qquad (11.25)$$

и

$$\zeta = \frac{RB_{eff} + K_I(K_b + K_1K_t)}{2\sqrt{nK_\theta K_I RJ_{eff}}}. \qquad (11.26)$$

Пусть k_{eff} будет коэффициентом эффективной упругости звена робота. Тогда остаточный момент вращения с учетом упругости будет равен $k_{eff}\theta$.

Применяя принцип Д'Аламбера, получаем:

$$-k_{eff}\theta = J_{eff}\ddot{\theta}. \qquad (11.27)$$

Таким образом, собственная частота резонанса (рад/с) будет

$$\omega_r = \sqrt{k_{eff}/J_{eff}}. \qquad (11.28)$$

Так как k_{eff} для звена является величиной постоянной, а J_{eff} меняется с переменной нагрузки, то соответственно меняется ω_r. Пусть ω — измеренное значение собственной резонансной частоты звена при соответствующем значении эффективной инерции J. Тогда

$$\omega = \sqrt{k_{eff}/J}. \qquad (11.29)$$

Таким образом, из соотношений (11.28) и (11.29) получаем

$$\omega_r = \omega\sqrt{J/J_{eff}}. \qquad (11.30)$$

Измеренные значения ω и соответствующие им значения J для манипулятора Стэнфордского университета приведены в табл. 11.4 [4]. При проектировании рекомендуется [7] иметь запас надежности

11.4. Измеренные значения частоты и инерции звеньев манипулятора Стэнфордского университета

Номер звена	J, кг·м²	f, Гц	ω (= $2\pi f$) (рад/с)
1	5	4	25,1327
2	5	6	37,6991
3	7	20	125,6636
4	0,1	15	94,2477
5	0,1	15	94,2477
6	0,04	20	125,6636

200 %, т. е. следует устанавливать значение частоты вращения без учета затуханий ω_n, равным не более половины величины собственной резонансной частоты ω_r. Таким образом, из соотношений (11.25) и (11.30) получаем:

$$\sqrt{\frac{nK_\theta K_I}{RJ_{eff}}} \leqslant \omega \frac{\sqrt{J/J_{eff}}}{2} \qquad (11.31)$$

или после упрощений

$$K_\theta \leqslant (J\omega^2)R/(4nK_I). \qquad (11.32)$$

Соотношение (11.32) устанавливает верхнюю границу K_θ. Остается определить границы для K_1. Из практических соображений обычно избегают создавать устройство позиционного управления без затухания. Таким образом, $\zeta \geqslant 1$, и из соотношения (11.26) получаем:

$$RB_{eff} + K_I(K_b + K_1K_t) \geqslant$$
$$\geqslant 2\sqrt{nK_\theta K_I RJ_{eff}} > 0. \qquad (11.33)$$

При традиционном проектировании K_θ в правой части неравенства (11.33) заменяется значением своей верхней границы, полученной из (11.32). Тогда выражение (11.33) сводится к

$$K_1 \geqslant \frac{R\left(\omega\sqrt{JJ_{eff}} - B_{eff}\right)}{K_I K_t} - \frac{K_b}{K_t}. \qquad (11.34)$$

Так как J_{eff} меняется с изменением нагрузки, то соответственно изменяется нижняя граница K_1. Если характеристики нагрузки известны заранее, то можно заранее определить их и J_{eff} и установить нижнюю границу коэффициента. С другой стороны, для упрощения расчетов устройства управления можно задать фиксированное значение коэффициента усиления, и тогда в соотношении (11.34) следует использовать максимальное значение J_{eff}, исключая возможность самовозбуждения системы.

11.2.3. Статическая погрешность устройств управления звеном

В предыдущем разделе на рис. 11.6, *в* была изображена блок-схема устройства позиционного управления независимым звеном робота. Из-за воздействия на двигатель физических сил f_m, τ_L, τ_g и τ_c замкнутая функция преобразования устройства управления имеет вид, отличный от выражения (11.22), так как должна учитывать эти воздействия. Из рис. 11.6, *в* видно, что

$$(J_{eff}s^2 + B_{eff}s)\Theta_m = T_m(s) - F_m(s) -$$
$$- T_g(s) - nT_L(s). \quad (11.35)$$

В соотношении (11.35) не учтено влияние центробежной силы. Оно будет рассмотрено отдельно. После преобразования имеем:

$$T_m(s) = K_1[V(s) - s(K_b +$$
$$+ K_1K_t)\Theta_s(s)/n]/R \quad (11.36)$$

и

$$V(s) = K_\theta[\Theta_d(s) - \Theta_s(s)]. \qquad (11.37)$$

Из этого после алгебраических преобразований получаем:

$$\Theta_s(S) = \frac{nK_\theta K_I\Theta_d(s) - nR[F_m(s) + T_g(s) + nT_L(s)]}{\Omega(s)}; \qquad (11.38)$$

$$\Omega(s) = RJ_{eff}s^2 + [RB_{eff} + K_I(K_b +$$
$$+ K_1K_t)]s + nK_\theta K_I. \quad (11.39)$$

Если значениями $F_m(s)$, $T_g(s)$ и $T_L(s)$ пренебречь, то соотношение (11.38) принимает вид (11.22). Так как позиционная ошибка $e(t)$ равна

$$e(t) = \theta_d(t) - \theta_s(t), \qquad (11.40)$$

то с учетом (11.38) соотношение (11.40) можно представить в виде:

$$E(s) = (\{RJ_{eff}s^2 + [RB_{eff} +$$
$$+ K_I(K_b + K_1K_t)]\,s\}\,\Theta_d(s) +$$
$$+ nR[F_m(s) + T_g(s) + nT_L(s)])/(\Omega(s)), \qquad (11.41)$$

где $E(s)$ — преобразование Лапласа от $e(t)$. Для постоянной нагрузки имеет место $\tau_L = C_L$. Следовательно, $f_m = C_f$ и $\tau_g = C_g$ также величины постоянные, и $T_L(s) = C_L/s$, $F_m(s) = C_F/s$, а $T_g(s) = C_g/s$. В результате соотношение (11.41) принимает вид:

$$E(s) = (\{RJ_{eff}s^2 + [RB_{eff} +$$
$$+ K_I(K_b + K_1K_t)]\,s\}\,X(s) +$$
$$+ nR(C_f + C_g + nC_L)/s)/(\Omega(s)), \quad (11.42)$$

где вместо $\Theta_d(s)$ используем $X(s)$, представляющее собой обобщенное входное воздействие.

Статическая погрешность e_{ss} может быть получена по теореме пределов и имеет вид:

$$e_{ss} = \lim_{t\to\infty} e(t) = \lim_{s\to 0} sE(s), \quad (11.43)$$

если указанные пределы существуют.

11.2.4. Статическая позиционная погрешность и ее компенсация

Если входное воздействие представляет собой постоянное смещение C_θ, то

$$X(s) = \Theta_d(s) = C_\theta/s. \qquad (11.44)$$

Из соотношения (11.43) получаем статическую позиционную погрешность

$$e_{ssp} = R(C_f + C_g + nC_L)/(K_\theta K_I). \quad (11.45)$$

Так как K_θ ограничено сверху соотношением (11.32), величина этой погрешности не может быть уменьшена до произвольно малого значения путем регулирования параметра K_θ. Однако если заранее известны значения τ_L, f_m и τ_g, то их можно ввести в устройство управления для компенсации силовых воздействий. Аналогично на вход устройства управления в качестве дополнительного сигнала подаются ожидаемые значения момента силы тяжести τ_a и компенсирующего момента τ_d, как это показано на рис. 11.7, *а*, где $T_a(s)$ и $T_d(s)$ — соответственно преобразования Лапласа от τ_a и τ_d. С этими обозначениями выражение для погрешности (11.41) представляется в виде:

$$E(s) = (\{RJ_{eff}s^2 + [RB_{eff} +$$
$$+ K_I(K_b + K_1K_t)]\,s\}\,X(s) +$$
$$+ nR\{F_m(s) + T_g(s) + nT_L(s) -$$
$$- K_IK_R[T_a(s) + T_d(s)]/R\})/(\Omega(s)), \quad (11.46)$$

где вместо $\Theta_d(s)$ используем $X(s)$, представляющее собой обобщенное входное воздействие. Если на вход подается постоянное смещение $X(s) = \Theta_d(s) = C_\theta/s$, то выражение для статической позиционной погрешности приобретает вид:

$$e_{ssp} = (\lim_{s\to 0} s\,\{R[F_m(s) + T_g(s) +$$
$$+ nT_L(s)] - K_IK_R[T_a(s) + T_d(s)]\})/(K_\theta K_I), \qquad (11.47)$$

если $T_a(s) = RT_g(s)/(K_IK_R)$ и $T_d(s) = R[F_m(s) + nT_L(s)]/(K_IK_R)$, то значение статической погрешности становится равным нулю. На практике можно для уменьшения погрешности задать значения

$$\tau_a = (R/(K_IK_R))\,\hat{\tau}_g \qquad (11.48)$$

и

$$\tau_d = (R/(K_IK_R))\,(\hat{f}_m + n\hat{\tau}_L), \quad (11.49)$$

где $\hat{\tau}_g$, $\hat{f}_m$ и $\hat{\tau}_L$ — соответственно оцениваемые значения τ_g, f_m и τ_L. Для нашей задачи значение τ_L, включающее в себя момент упругости, обычно известно. Таким образом, значение $\hat{\tau}_L$ может быть установлено непосредственно. Полученные экспериментально значения f_m обычно используются для задания $\hat{f}_m$. Значение $\hat{\tau}_g$ обычно вычисляется по методике, рассмотренной в разделе, посвященному устройству управления многозвенным манипулятором

Каково влияние момента центробежной силы $\tau_C(t)$ на величину статической позиционной погрешности? Так как $\tau_C(t) = D[\dot{\theta}_s(t)]^2$, где D — коэффициент пропорциональности, то для устойчивого устройства управления $\dot{\theta}_s(t) \to 0$ при $t \to \infty$ и это влияние отсутствует. Поэтому при рассмотрении статических позиционных погрешностей в устройстве управления не требуется введения предварительной компенсации центробежной силы.

К сожалению, для серийных промышленных роботов преобладающим является момент сил трения. Трение покоя трудно компенсировать, так как его величина не постоянна и неизвестна заранее. Из-за этого преобладания неточная компенсация сил трения в значительной степени влияет на компенсацию воздействий от других составляющих. Однако ожидается, что в перспективных разработках промышленных роботов влияние сил трения будет сведено к минимуму, как, например, в манипуляторах с прямым приводом университета Карнеги—Меллон [8] и Массачусетского технологического института [9]. Если влияние сил трения мало и скомпенсированы все воздействия, то, как это было показано в [8], ответная реакция повторяет входное воздействие с малым запаздыванием.

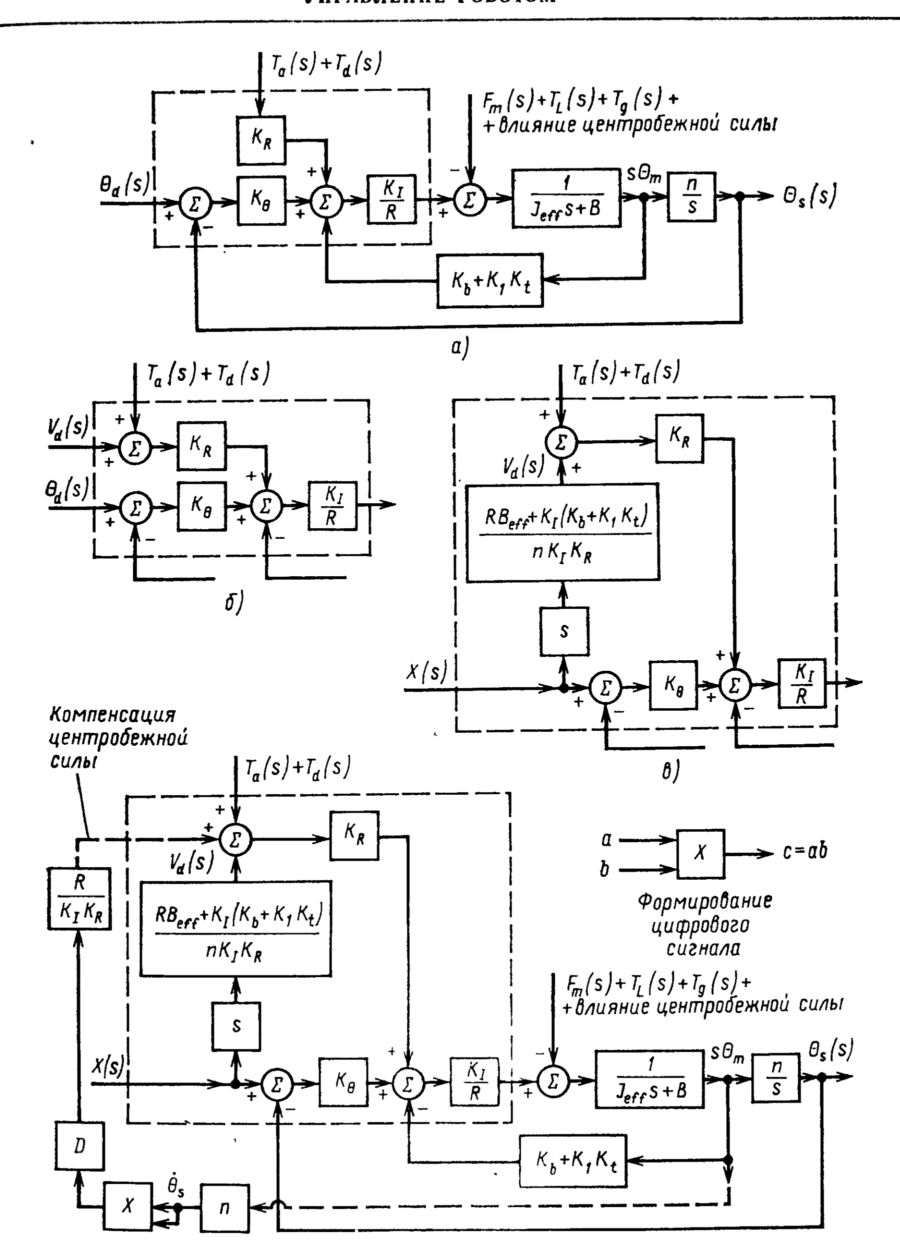


Рис. 11.7. Схема работы устройства управления с предварительной оценкой и компенсацией силовых воздействий

11.3. Устройство управления звеном робота при сопровождении конвейера

Довольно часто робот должен сопровождать движущийся с постоянной скоростью конвейер и выполнять при этом определенные действия. В этом случае для синхронизации с движущимся конвейером задающий положение входной сигнал $\theta_d(t)$ должен подаваться очень часто, до 60 раз в секунду. Кроме того, на вход подается линейно-возрастающий входной сигнал $C_v(t)$ с постоянной скоростью возрастания, т. е. $X(s) = C_v/s^2$.

11.3.1. Скоростная погрешность и ее компенсация

Применяя теорему пределов к соотношению (11.46) и подставив $X(s) = C_v/s^2$, получаем выражение для скоростной погрешности:

$$e_{ssv} = \frac{[RB_{eff} + K_I(K_b + K_1K_t)]\, C_v}{(nK_\theta K_I)} + e_{ssp}. \qquad (11.50)$$

Отметим, что составляющая центробежной силы τ_c не входит в соотношение (11.50). Хотя, когда робот находится в движении, она существует, так как $\theta_s(t) \neq 0$. И когда робот движется с большой скоростью, ее влияние становится значительным. В сущности, центробежная сила действует на всем пути движения робота. Ее компенсация будет рассмотрена позднее. Так как в устройстве управления во избежание самовозбуждения используют $\zeta \geqslant 1$, то с учетом (11.33), соотношение (11.50) принимает вид:

$$e_{ssv} \geqslant 2C_v \sqrt{\frac{RJ_{eff}}{(nK_\theta K_I)}} + e_{ssp}. \qquad (11.51)$$

Если контроллер спроектирован консервативно и соответствует условию $\omega_n \leqslant \omega_r/2$, тогда действует уравнение (11.32) и уравнение (11.51) принимает следующий вид:

$$e_{ssv} \geqslant 4\left(\frac{C_v}{\omega}\right)\sqrt{\frac{J_{eff}}{J}} + e_{ssp}, \qquad (11.52)$$

что определяет нижнюю границу стационарной скоростной погрешности.

Для уменьшения стационарной скоростной погрешности в устройство управления вводится дополнительный линейный корректирующий сигнал v_d вместе с τ_a и τ_d с постоянным нарастанием, соответствующим скорости возрастания входного линейного сигнала. Это изображено на рис. 11.7, *б*, где $V_d(s)$ — преобразование Лапласа от v_d. Окончательно $E(s)$, задаваемое соотношением (11.46), преобразуется к виду:

$$E(s) = (\{RJ_{eff}s^2 + [RB_{eff} + K_I(K_b + K_1K_t)]\, s\}\, X(s) - nK_IK_RV_d(s) + nR\{F_m(s) + T_g(s) + nT_L(s) - K_IK_R[T_a(s) + T_d(s)]/R\})/(\Omega(s)), \qquad (11.53)$$

а величина e_{ssv} из (11.50) становится равной

$$e_{ssv} = \frac{\{[RB_{eff} + K_I(K_b + K_1K_t)] \times C_v - nK_IK_R \lim sV_d(s)\}}{(nK_\theta K_I)} + e_{ssp}. \qquad (11.54)$$

Первое слагаемое в e_{ssv} обращается в ноль, если

$$V_d(s) = \frac{s(C_v/s^2)\,[RB_{eff} + K_I(K_b + K_1K_t)]}{(nK_IK_R)}. \qquad (11.55)$$

Но $C_v/s^2 = X(s)$ представляет собой линейно возрастающий входной сигнал. Следовательно,

$$v_d = \frac{(dx/dt)\;[RB_{eff} + K_I(K_b + K_1K_t)]}{(nK_1K_R)}, \qquad (11.56)$$

что может быть получено непосредственно со входа устройства управления [10], как показано на рис. 11.7, *в*. Так как $x(t)$ есть нарастающий входной сигнал C_vt или, что то же самое, $X(s) = C_v/s^2$, то dx/dt имеет постоянную скорость возрастания C_v или $sX(s) = C_v/s$. Очевидно, что можно вычислить dx/dt из отношения $[x(t_i) - x(t_{i-1})]/(t_i - t_{i-1})$, где $x(t_i)$ и $x(t_{i-1})$ — значения двух последовательных входных сигналов. Очевидно, что эти соглашения справедливы и для стационарной погрешности при простом позиционном управлении. Когда устройство управления переходит из режима сопровождения конвейера в режим позиционного управления, то $x(t)$ принимает вид ступенчатого входного сигнала C_θ, или $X(s) = \Theta_d(s) = C_\theta/s$. Тогда для прекращения компенсации скоростной погрешности на вход подается импульс $dx/dt = C_\theta\delta(t)$ или $sX(s) = C_\theta$ (поглощаемый энергонакапливающими элементами схемы).

11.3.2. Компенсация центробежной силы

Влияние центробежной силы $\tau_c(t)$ может быть вычислено из $D[\dot{\theta}_s(t)]^2$, где D — коэффициент пропорциональности, а $\dot{\theta}_s$ — скорость вращения оси звена робота. Величина скорости может быть измерена тахометром. Значение параметра D зависит от геометрических размеров робота (см. ниже). Если D известно, то можно определить значение $\tau_c(t)$. Это значение затем используется для компенсации. Эта компенсация вводится в систему в точке, где на вход подаются T_a и T_d (см. рис. 11.7, *в*). При этом для компенсации существующего усиления в цепи следует ввести коэффициент передачи $R/(K_I K_R)$. На рис. 11.7, *г* изображена схема предварительной компенсации центробежной силы.

11.4. Устройство управления многозвенного манипулятора

Очевидно, что перемещение любого звена робота зависит от других звеньев. Силомоментное взаимодействие движущихся звеньев делает неадекватным рассмотренное выше устройство позиционного управления отдельным звеном. Требуется дополнительная компенсация. Для определения компенсирующих воздействий необходимо рассмотреть поведение робота в динамике.

11.4.1. Динамическое уравнение по Лагранжу

Уравнение Лагранжа рассматривается во многих книгах по физике. Оно описывает поведение системы упругих тел в динамике и выглядит следующим образом:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i, \quad i = 1, 2, \ldots, n, \tag{11.57}$$

где q_i — обобщенные координаты; $L = L(q_1, \ldots, q_n, \dot{q}_1, \ldots, \dot{q}_n)$ — функция Лагранжа; τ_i — обобщенная функция воздействия.

Обобщенными координатами q_i описывается смещение θ_s звена i. Функция Лагранжа может быть также определена как L = (кинематическая энергия системы) — (потенциальная энергия системы).

Применяя уравнение Лагранжа к роботу с n звеньями, получаем [6, 10]:

$$\tau_i = \sum_{j=1}^{n} D_{ij}\ddot{q}_j + J_{ai}\ddot{q}_i + \sum_{j=1}^{n} D_{ijj}(\dot{q}_j)^2 + \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n} D_{ijk}\dot{q}_j\dot{q}_k + D_i, \quad j \neq k, \tag{11.58}$$

где

$$D_{ij} = \sum_{p=\max(i,j)}^{n} Tr\,[\mathbf{U}_{pj}\mathbf{J}_p(\mathbf{U}_{pi})']; \tag{11.59}$$

$$D_{ijk} = \sum_{p=\max(i,j,k)}^{n} Tr\,[\mathbf{U}_{pjk}\mathbf{J}_p(\mathbf{U}_{pi})']; \tag{11.60}$$

$$D_i = -\sum_{p=i}^{n} m_p \hat{\mathbf{g}}'\mathbf{U}_{pi}\hat{\mathbf{r}}_p, \tag{11.61}$$

где Tr — оператор определения следа; $(\,)'$ — матрица, транспонированная из $(\,)$; τ_i — обобщенное входное воздействие для звена i; m_p — масса p-го звена; $\hat{\mathbf{r}}_p$ — вектор, описывающий положение центра масс звена в связанной системе координат звена p; $\hat{\mathbf{g}}'$ — [0, 0, 9,8, 0 м/с²] — вектор ускорения свободного падения на уровне моря; $\mathbf{J}_p$ — матрица инерции звена p.

$$\mathbf{U}_{pi} = \frac{\partial \mathbf{T}_0^p}{\partial q_i} = \begin{cases} \left(\mathbf{T}_0^{j-1}\right)\mathbf{Q}_j\left(\mathbf{T}_{j-1}^p\right) & \text{для } p \geqslant j; \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \tag{11.62}$$

$$\mathbf{U}_{pjk} = \frac{\partial^2 \mathbf{T}_0^p}{\partial q_j \partial q_k} = \begin{cases} \left(\mathbf{T}_0^{j-1}\right)\mathbf{Q}_j\left(\mathbf{T}_{j-1}^{k-1}\right)\mathbf{Q}_k\left(\mathbf{T}_{k-1}^p\right), & \text{если } p \geqslant k \geqslant j; \\ \left(\mathbf{T}_0^{k-1}\right)\mathbf{Q}_k\left(\mathbf{T}_{k-1}^{j-1}\right)\mathbf{Q}_j\left(\mathbf{T}_{j-1}^p\right), & \text{если } p \geqslant j \geqslant k; \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \tag{11.63}$$

$$\mathbf{Q}_j = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & \text{если звено } j \text{ вращательное;} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & \text{если звено } j \text{ поступательное.} \end{cases} \tag{11.64}$$

$\mathbf{T}_j^k$ — матрица размером 4×4, переводящая произвольный вектор в системе коор-

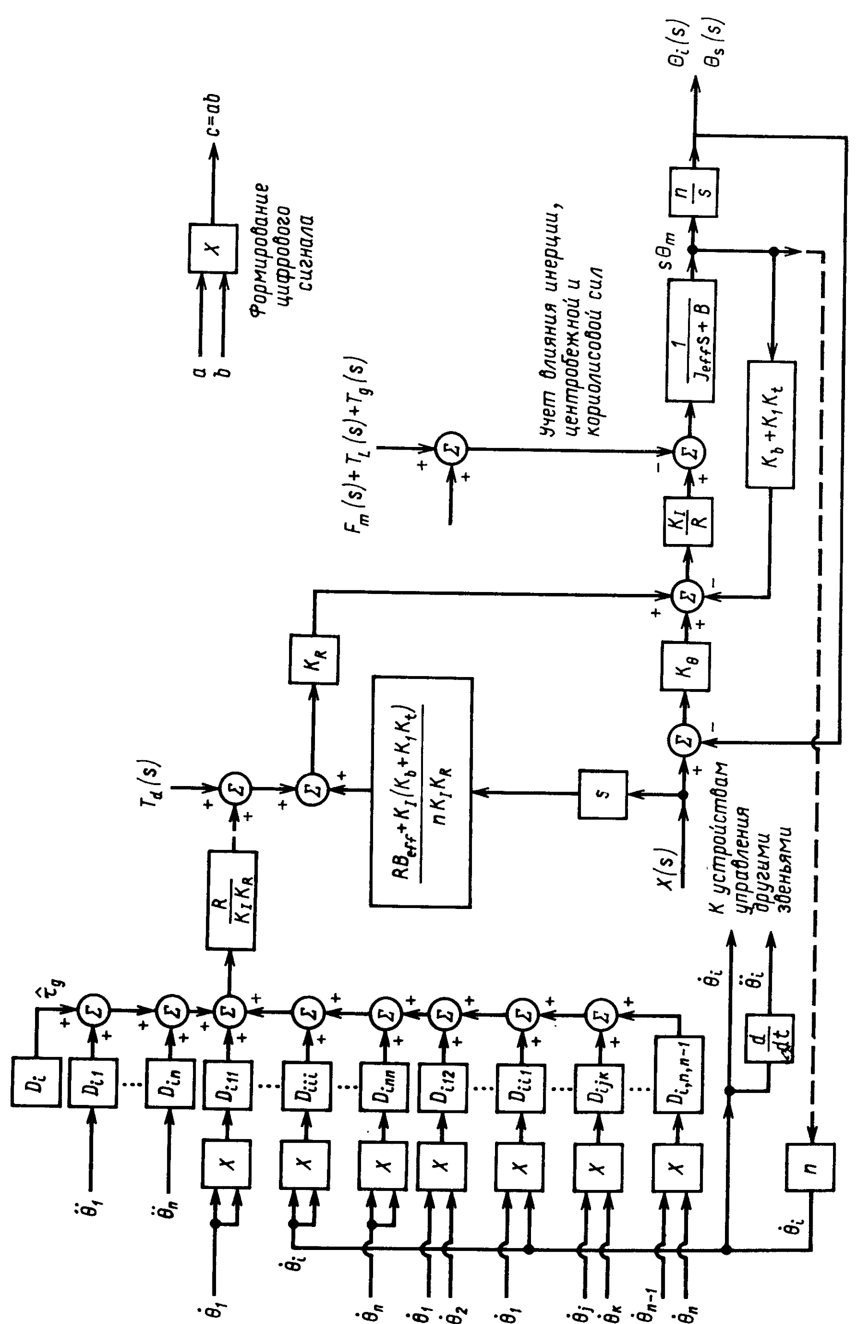


Рис. 11.8. Полная блок-схема устройства управления i-м звеном робота с n звеньями

инат звена k в тот же вектор в системе оординат звена j; q_k — обобщенные коор-инаты (смещения звеньев).

11.4.2. Взаимосвязь звеньев и ее компенсация

Как видно из уравнения (11.58), для аждого звена требуемое усилие или мо-ент распадается на пять слагаемых. Пер-ое слагаемое отражает влияние инерции сех звеньев. В отличие от случая управле-ия одним звеном, где предполагалось, что веньья движутся независимо и свободно, ейчас мы учитываем влияние движущихся веньев друг на друга. Это сумма момен-ов $\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} D_{ij}\ddot{q}_j$ должна быть введена в уст-ойство управления i-го звена для компен-ации взаимодействий между звеньями рис. 11.8). Второе слагаемое в уравнении 11.58) представляет собой момент инерции ривода i-го звена, который входит в J_{eff} так же, как при рассмотрении устройства управления одним звеном). Последнее сла-аемое выражает зависимость от силы тя-жести, которая также компенсируется вво-дом параметра τ_a. Это сигнал об ожидае-мой величине момента сил тяжести, который может быть вычислен из уравнения (11.48), т. е. $\tau_a = (R/(K_I K_R))/\hat{\tau}_g$, где $\hat{\tau}_g$ — оценивае-мое значение момента силы тяжести τ_g. Очевидно, что для получения лучшей оцен-ки для τ_g устройства управления i-го звена можно использовать D_i, т. е. из соотноше-ния (11.61) устанавливаем для i-го звена

$$\hat{\tau}_g = D_i = -\sum_{p=i}^{n} m_p \hat{\mathbf{g}}' \mathbf{U}_{pi} \hat{r}_p. \qquad (11.65)$$

Третье и четвертое слагаемые в уравне-нии (11.58) задают соответственно величину влияния центробежных и кориолисовых сил. И опять сигналы, соответствующие значению моментов, должны быть введены в устрой-ство управления i-го звена для компенса-ции физических взаимодействий между звеньями (см. рис. 11.8). На рисунке изо-бражена полная блок-схема устройства уп равления i-м звеном промышленного робота для $i = 1, 2, \ldots, n$. Для обеспечения ра-ботоспособности этих n устройств управле-ния должны быть вычислены значения по-даваемых на вход параметров D_{ij}, D_{ijk} и D_i для каждого конкретного робота (см. ниже).

11.4.3. Расчет значений, компенсирующих инерционное взаимодействие

К сожалению, вычисление значения D_{ij} очень сложно и трудоемко. Чтобы проил-люстрировать эту сложность, раскроем ура-внение (11.58) для $n = 6$, т. е. для манипу-лятора из шести звеньев:

$$\begin{gathered}\tau_i = D_{i1}\ddot{q}_1 + D_{i2}\ddot{q}_2 + \ldots + D_{i6}\ddot{q}_6 + J_{ai}\ddot{q}_i + \\ + D_{i11}\dot{q}_1^2 + D_{i22}\dot{q}_2^2 + \ldots + D_{i66}\dot{q}_6^2 + \\ + D_{i22}\dot{q}_1\dot{q}_2 + D_{i13}\dot{q}_1\dot{q}_3 + \ldots + D_{i16}\dot{q}_1\dot{q}_6 + \ldots \\ \ldots + D_{i45}\dot{q}_4\dot{q}_5 + \ldots + D_{i56}\dot{q}_5\dot{q}_6 + D_i, \\ i = 1, 2, \ldots, 6. \qquad (11.66)\end{gathered}$$

Для $i = 1$ член $D_{i1} = D_{11}$ раскрывается да-лее, как это показано на рис. 11.9, где $\theta_i = q_i$ для $i = 1, 2, \ldots, 6$. Очевидно, что это непростая вычислительная задача, осо-бенно, если позиционные параметры и па-

$$\begin{aligned}D_{11} = m_1 k_{122}^2 \\ &+ m_2[k_{211}^2 s^2\theta_2 + k_{233}^2 c^2\theta_2 + r_2(2\bar{y}_2 + r_2)] \\ &+ m_3[k_{322}^2 s^2\theta_2 + k_{333}^2 c^2\theta_2 + r_3(2\bar{z}_3 + r_3)s^2\theta_2 + r_2^2] \\ &+ m_4\{\tfrac{1}{2}k_{411}^2[s^2\theta_2(2s^2\theta_4 - 1) + s^2\theta_4] + \tfrac{1}{2}k_{422}^2(1 + c^2\theta_2 + s^2\theta_4) \\ &\quad + \tfrac{1}{2}k_{433}^2[s^2\theta_2(1 - 2s^2\theta_4) - s^2\theta_4] + r_3^2 s^2\theta_2 + r_2^2 - 2\bar{y}_4 r_3 s^2\theta_2 + 2\bar{z}_4(r_2 s\theta_4 + r_3 s\theta_2 c\theta_2 c\theta_4)\} \\ &+ m_5\{\tfrac{1}{2}(-k_{511}^2 + k_{522}^2 + k_{533}^2)[(s\theta_2 s\theta_5 - c\theta_2 s\theta_4 c\theta_5)^2 + c^2\theta_4 c^2\theta_5] \\ &\quad + \tfrac{1}{2}(k_{511}^2 - k_{522}^2 + k_{533}^2)(s^2\theta_4 + c^2\theta_2 c^2\theta_4) \\ &\quad + \tfrac{1}{2}(k_{511}^2 + k_{522}^2 - k_{533}^2)[(s\theta_2 c\theta_5 + c\theta_2 s\theta_4 s\theta_5)^2 + c^2\theta_4 s^2\theta_5] + r_3^2 s^2\theta_2 + r_2^2 \\ &\quad + 2\bar{z}_5[r_3(s^2\theta_2 c\theta_5 + s\theta_2 s\theta_4 c\theta_4 s\theta_5) - r_2 c\theta_4 s\theta_5]\} \\ &+ m_6\{\tfrac{1}{2}(-k_{611}^2 + k_{622}^2 + k_{633}^2)[(s\theta_2 s\theta_5 c\theta_6 - c\theta_2 s\theta_4 c\theta_5 c\theta_6 - c\theta_2 c\theta_4 s\theta_6)^2 + (c\theta_4 c\theta_5 c\theta_6 - \\ &\quad s\theta_4 s\theta_6)^2] \\ &\quad + \tfrac{1}{2}(k_{611}^2 - k_{622}^2 + k_{633}^2)[(c\theta_2 s\theta_4 c\theta_5 s\theta_6 - s\theta_2 s\theta_5 s\theta_6 - c\theta_2 c\theta_4 c\theta_6)^2 + (c\theta_4 c\theta_5 s\theta_6 + \\ &\quad s\theta_4 c\theta_6)^2] \\ &\quad + \tfrac{1}{2}(k_{611}^2 + k_{622}^2 - k_{633}^2)[(c\theta_2 s\theta_4 s\theta_5 + s\theta_2 c\theta_5)^2 + c^2\theta_4 s^2\theta_5] \\ &\quad + [r_6 c\theta_2 s\theta_4 s\theta_5 + (r_6 c\theta_5 + r_3)s\theta_2]^2 + (r_6 c\theta_4 s\theta_5 - r_2)^2 \\ &\quad + 2\bar{z}_6[r_6(s^2\theta_2 c^2\theta_5 + c^2\theta_4 s^2\theta_5 + c^2\theta_2 s^2\theta_4 s^2\theta_5 + 2s\theta_2 c\theta_2 s\theta_4 s\theta_5 c\theta_5) \\ &\qquad + r_3(s\theta_2 c\theta_2 s\theta_4 s\theta_5 + s^2\theta_2 c\theta_5) - r_2 c\theta_4 s\theta_5]\}\end{aligned}$$

Рис. 11.9. Коэффициент в выражении для инерции первого звена

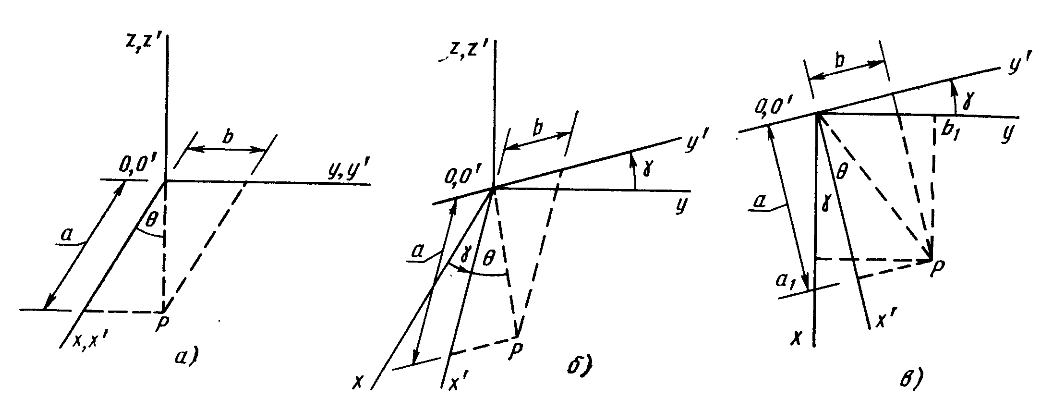


Рис. 11.10. Вращение системы координат относительно базовой системы координат

раметры ориентации изменяются при дви-жении робота. Существуют три различных способа упрощений, а именно графоанали-тический, комбинированный и дифферен-циальных преобразований. Метод графоана-литических оценок Бейчи [11] зависит от типа звеньев: вращательных и призматиче-ских. Таким образом, матрицы $\mathbf{T}_j^k$ в урав-нениях (11.62), (11.63) и (11.64) сразу уп-рощаются. Так как многие элементы в че-тырехмерных квадратных матрицах нули, то итоговые выражения для D_i, D_{ij} и D_{ijk} становятся менее сложными [11]. Комбини-рованный метод Лу и Лина [12] основан на почленном сравнении динамических урав-нений Ньютона — Эйлера [13] с помощью ЭВМ. При некоторых условиях, отдельные члены можно опустить. Оставшиеся члены перегруппируются в уравнение Лагранжа. трицы производных, легко поддающиеся уп-рощенное уравнение в символическом виде. С помощью метода дифференциальных пре-образований Пола [10] частные матричные производные $\partial \mathbf{T}_0^p / \partial q_j$ преобразуются в ма-тричное произведение преобразования и ма-трицы производных, легко поддающиеся уп-рощению. Третий подход рассматривается ниже. Сперва рассмотрим матрицу разме-ром 4×4, соответствующую однородному преобразованию, описывающему вращение и перенос векторов в некоторой системе ко-ординат.

На рис. 11.10, *а* изображены две совпа-дающие системы координат (x, y, z) и (x', y', z'). Точка P задана в системе коорди-нат (x', y', z'), т. е. при перемещении си-стемы координат (x', y', z') относительно (x, y, z), точка P движется вместе с ней. Предположим, что система координат (x', y', z') поворачивается на угол γ (радиан) вокруг оси z (см. рис. 11.10, *б*). Так как точка P движется вместе с системой коор-динат (x', y', z'), то ее положение в этой системе координат остается неизменным. Однако в системе координат (x, y, z) по-ложение точки P меняется. Из рис. 11.10 видно, что

$$\begin{cases} a_1 = a\cos\gamma - b\sin\gamma \\ b_1 = a\sin\gamma + b\cos\gamma \\ c_1 = c \end{cases} \qquad (11.67)$$

или, что то же самое,

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ 1 \end{bmatrix}. \qquad (11.68)$$

Причина использования дополнительных четвертой строки и четвертого столбца в матрице из уравнения (11.68) будет ясна, когда мы рассмотрим преобразование пере-носа. Одновременно матрица из уравнения (11.68) является однородным преобразова-нием, осуществляющим вращение вектора или точки P и, следовательно, всей системы координат (x', y', z') на угол γ (радиан) вокруг оси z. Для удобства обозначим эту матрицу $\mathbf{R}(z, \gamma)$ и уравнение (11.68) пре-образуется к виду:

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}(z, \gamma) \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ 1 \end{bmatrix}. \qquad (11.69)$$

Аналогично

$$\mathbf{R}(x,\alpha)=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0\\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}; \tag{11.70}$$

$$\mathbf{R}(y,\beta)=\begin{bmatrix}\cos\beta & 0 & \sin\beta & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}.$$

Теперь предположим, что система координат (x', y', z') поворачивается на угол β (радиан) вокруг оси y и на угол α (радиан) вокруг оси x. И снова положение точки P в системе координат (x', y', z') не изменяется, а в системе (x, y, z) изменяется с (a_1, b_1, c_1) на (a_2, b_2, c_2), т. е.

$$\begin{bmatrix}a_2\\ b_2\\ c_2\\ 1\end{bmatrix}=R(x,\alpha)\,\mathbf{R}(y,\beta)\,\mathbf{R}(z,\gamma)\begin{bmatrix}a\\ b\\ c\\ 1\end{bmatrix} \tag{11.71}$$

или

$$\begin{bmatrix}a_2\\ b_2\\ c_2\\ 1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}R_{11} & R_{12} & R_{13} & 0\\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & 0\\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a\\ b\\ c\\ 1\end{bmatrix}, \tag{11.72}$$

где

$$\begin{aligned}
R_{11} &= \cos\beta\cos\gamma\\
R_{12} &= -\cos\beta\sin\gamma\\
R_{13} &= \sin\beta\\
R_{21} &= \cos\alpha\sin\gamma+\sin\alpha\sin\beta\cos\gamma\\
R_{22} &= \cos\alpha\cos\gamma-\sin\alpha\sin\beta\sin\gamma\\
R_{23} &= -\sin\alpha\cos\beta\\
R_{31} &= \sin\alpha\sin\gamma-\cos\alpha\sin\beta\cos\gamma\\
R_{32} &= \sin\alpha\cos\gamma+\cos\alpha\sin\beta\sin\gamma\\
R_{33} &= \cos\alpha\cos\beta
\end{aligned} \tag{11.73}$$

А теперь предположим, что система координат (x', y', z') смещается на t_x, t_y и t_z единиц соответственно по осям x, y и z. Тогда

$$\begin{bmatrix}a_3\\ b_3\\ c_3\\ 1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_2\\ b_2\\ c_2\\ 1\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}t_x\\ t_y\\ t_z\\ 1\end{bmatrix}=$$

$$=\begin{bmatrix}R_{11} & R_{12} & R_{13} & t_x\\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & t_y\\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & t_z\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a\\ b\\ c\\ 1\end{bmatrix}. \tag{11.74}$$

Обозначим

$$\mathbf{L}(t_x, t_y, t_z)=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & t_x\\ 0 & 1 & 0 & t_y\\ 0 & 0 & 1 & t_z\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{11.75}$$

упомянутое выше преобразование линейного переноса. Тогда матрица размером $4\times\times 4$ из (11.74) может быть записана в виде:

$$\mathbf{L}(t_x, t_y, t_z)\,\mathbf{R}(x,\alpha)\,\mathbf{R}(y,\beta)\,\mathbf{R}(z,\gamma)=$$

$$=\begin{bmatrix}R_{11} & R_{12} & R_{13} & t_x\\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & t_y\\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & t_z\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}, \tag{11.76}$$

что означает поворот на угол γ (радиан) вокруг оси z, далее поворот на угол β (радиан) вокруг оси y, затем поворот на угол α (радиан) вокруг оси x и после этого перенос вдоль осей x, y и z соответственно на t_x, t_y и t_z. Таким образом, матрица размером 4×4, называемая однородным преобразованием, описывает как вращение, так и перенос системы координат (x', y', z'). Так как операция умножения матриц некоммутативна, порядок умножения матриц $\mathbf{L}$ и $\mathbf{R}$ в уравнении (11.76) не может меняться. Стоит только поменять местами в уравнении (11.76), например, $\mathbf{R}(x, \alpha)$ и $\mathbf{R}(y, \beta)$ или $\mathbf{L}(t_x, t_y, t_z)$ и $\mathbf{R}(z, \gamma)$, результирующая матрица и, следовательно, весь порядок вращений и переносов будут нарушены.

Предположим, что p-е звено первоначально находится в точке P (рис. 11.11), тогда

$$\mathbf{T}_0^p=\begin{bmatrix}\mathbf{x}_p & \mathbf{y}_p & \mathbf{z}_p & \mathbf{l}_p\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{11.77}$$

описывает систему координат, связанную с базовой. Теперь осуществим вращение звена в следующем порядке: на γ (радиан) вокруг оси z_0, на β (радиан) вокруг оси y_0 и на α (радиан) вокруг оси x_0; а затем

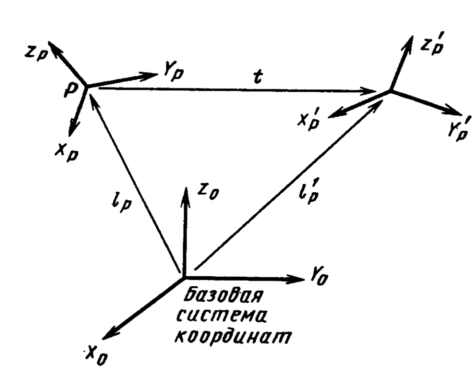


Рис. 11.11. Вращение и перенос системы координат относительно базовой системы координат

сместим звено в направлении вектора $\mathbf{t}$, заданного в системе координат (x_0, y_0, z_0). Предположим, что в результате ориентация и положение звена будут соответственно равны $(\mathbf{x}_p^1, \mathbf{y}_p^1, \mathbf{z}_p^1)$ и $\mathbf{l}_p^1$ в системе координат (x_0, y_0, z_0). Тогда текущее состояние рабочего органа в базовой системе координат описывается в виде:

$$\begin{bmatrix}\mathbf{x}_p^1 & \mathbf{y}_p^1 & \mathbf{z}_p^1 & \mathbf{l}_p^1\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}=$$

$$=\begin{bmatrix}R_{11} & R_{12} & R_{13} & t_x\\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & t_y\\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & t_z\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\mathbf{T}_0^p. \tag{11.78}$$

Теперь, если подвергнуть $\mathbf{T}_0^p$ малому смещению и вращению в базовой системе координат, то $t_x\leftarrow\delta_0 x$, $t_y\leftarrow\delta_0 y$, $t_z\leftarrow\delta_0 z$, $\alpha\leftarrow\leftarrow\delta_0\alpha$, $\beta\leftarrow\delta_0\beta$, $\gamma\leftarrow\delta_0\gamma$. Но $\cos(\delta_0\alpha)\simeq 1$, $\sin(\delta_0\alpha)\simeq\delta_0\alpha$, ..., $\delta_0\alpha\delta_0\beta\simeq 0$, ..., и т. д. Следовательно, из уравнения (11.73) получаем:

$$\begin{bmatrix}R_{11} & R_{12} & R_{13} & t_x\\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & t_y\\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & t_z\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}=$$

$$=\begin{bmatrix}1 & -\delta_0\gamma & \delta_0\beta & \delta_0 x\\ \delta_0\gamma & 1 & -\delta_0\alpha & \delta_0 y\\ -\delta_0\beta & \delta_0\alpha & 1 & \delta_0 z\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}. \tag{11.79}$$

С другой стороны имеем:

$$\begin{bmatrix}\mathbf{x}_p^1 & \mathbf{y}_p^1 & \mathbf{z}_p^1 & \mathbf{l}_p^1\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}=\mathbf{T}_0^p+\delta_0\mathbf{T}_0^p. \tag{11.80}$$

Сопоставляя уравнения (11.78), (11.79) и (11.80) получаем для возмущения:

$$\delta_0\mathbf{T}_0^p=\begin{bmatrix}0 & -\delta_0\gamma & \delta_0\beta & \delta_0 x\\ \delta_0\gamma & 0 & -\delta_0\alpha & \delta_0 y\\ -\delta_0\beta & \delta_0\alpha & 0 & \delta_0 z\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\mathbf{T}_0^p. \tag{11.81}$$

Матрица в уравнении (11.81) представляет собой вариационный оператор в базовой системе координат. Если вариация связана с системой координат p-го звена, то она должна быть умножена спереди на матрицу преобразования размером 4 на 4

$$\mathbf{T}_p^0=\left(\mathbf{T}_0^p\right)^{-1}, \tag{11.82}$$

которая преобразует любой вектор или координатную систему, заданные в базовой системе координат (x_0, y_0, z_0), в систему координат, связанную с p-м звеном. Таким образом, возмущение в системе координат p-го звена, выраженное в связанных координатах:

$$\delta_p\mathbf{T}_0^p=\left(\mathbf{T}_0^p\right)^{-1}\times$$

$$\times\begin{bmatrix}0 & -\delta_0\gamma_p & \delta_0\beta_p & \delta_0 x_p\\ \delta_0\gamma_p & 0 & -\delta_0\alpha_p & \delta_0 y_p\\ -\delta_0\beta_p & \delta_0\alpha_p & 0 & \delta_0 z_p\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\mathbf{T}_p^0. \tag{11.83}$$

Поэтому

$$\left(\mathbf{T}_0^p\right)^{-1}=\begin{bmatrix}x_{px} & x_{py} & x_{pz} & -x'_p\mathbf{l}_p\\ y_{px} & y_{py} & y_{pz} & -y'_p\mathbf{l}_p\\ z_{px} & z_{py} & z_{pz} & -z'_p\mathbf{l}_p\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}. \tag{11.84}$$

огда после некоторых алгебраических пре-
бразований (см. [10])

$$\delta_p \mathbf{T}_0^p = \begin{bmatrix} 0 & -z'_p\Delta_p & y'_p\Delta_p & x'_p(\Delta_p \mathbf{I}_p + d_p) \\ z'_p\Delta_p & 0 & -x'_p\Delta_p & y'_p(\Delta_p \mathbf{I}_p + d_p) \\ -y'_p\Delta_p & x'_p\Delta_p & 0 & z'_p(\Delta_p \mathbf{I}_p + d_p) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \qquad (11.85)$$

ак как $\delta_p \mathbf{T}_0^p$ есть возмущение в системе оординат p-го звена, выраженное в этих ке координатах, согласно уравнениям 11.81) можно записать:

$$\delta_p \mathbf{T}_0^p = \begin{bmatrix} 0 & -\delta_p\gamma & \delta_p\beta & \delta_p x \\ \delta_p\gamma & 0 & -\delta_p\alpha & \delta_p y \\ -\delta_p\beta & \delta_p\alpha & 0 & \delta_p z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{T}_p^p, \qquad (11.86)$$

де $\mathbf{T}_p^p$ — единичная матрица, так что

$$\begin{aligned} \delta_p\alpha &= x'_p\Delta_p; \\ \delta_p\beta &= y'_p\Delta_p; \\ \delta_p\gamma &= z'_p\Delta_p; \\ \delta_p x &= x'_p(\Delta_p \times \mathbf{I}_p + d_p); \\ \delta_p y &= y'_p(\Delta_p \times \mathbf{I}_p + d_p); \\ \delta_p z &= z'_p(\Delta_p \times \mathbf{I}_p + d_p). \end{aligned} \qquad (11.87)$$

з-за упрощенного вида уравнения (11.86) (11.87) являются основными для численых расчетов. Если возмущение в системе оординат p-го звена выразить в системе оординат j-го звена (x_j, y_j, z_j), получим:

$$\delta_j \mathbf{T}_o^p = \mathbf{T}_j^p (\delta_p \mathbf{T}_o^p). \qquad (11.88)$$

ереходя к пределу

$$\frac{\partial \mathbf{T}_o^p}{\partial q_j} dq_j = \mathbf{T}_j^p (\delta_p \mathbf{T}_o^p). \qquad (11.89)$$

огласно [10], при условии опускания всех ленов, соответствующих взаимным инерионным влияниям (как показывают опыы, описанные в [6, 10], это можно делать ез потери точности):

$$D_{ij} = \sum_{p=\max(i,j)}^{n} m_p \{[(\delta_p\alpha_i) k_{pxx}^2 (\delta_p\alpha_j) + (\delta_p\beta_i) k_{pyy}^2 (\delta_p\beta_j) + (\delta_p\gamma_j) k_{pzz}^2 (\delta_p\gamma_j)] + [\hat{\mathbf{r}}'_p ((\mathbf{T}_i^o d_p)(\mathbf{T}_j^o \Delta_p) + (\mathbf{T}_j^o \mathbf{d}_p)(\mathbf{T}_i^o \Delta_p))]\}, \qquad (11.90)$$

где $\delta_p\alpha_i$ — малый поворот системы координат звена p вокруг оси x, выраженный в координатах i-го звена, а k_{pxx} — радиус вращения xx звена p в системе координат звена p и т. д.

11.4.4. Компенсация гравитационной, центробежной и кориолисовой сил

Из уравнений (11.61) и (11.62) получаем:

$$D_i = -\sum_{p=i}^{n} m_p \hat{\mathbf{g}}' \frac{\partial \mathbf{T}_o^p}{\partial q_i} \hat{\mathbf{r}}_p. \qquad (11.91)$$

После некоторых алгебраических преобразований (см. [10])

$$D_i = \Gamma' \sum_{p=i}^{n} m_p (\hat{\mathbf{r}}_p^{i-1}), \qquad (11.92)$$

где $\hat{\mathbf{r}}_p^{i-1}$ — вектор описывающий положение центра масс звена p относительно $(i-1)$-й системы координат и

$$\Gamma' = \begin{cases} [-\hat{\mathbf{g}}'\mathbf{y}_{i-1} \hat{\mathbf{g}}' x_{i-1}\ 0\ 0], & \text{если звено вращательное;} \\ [0\ 0\ 0\ -\hat{g}' z_{i-1}], & \text{если звено поступательное.} \end{cases} \qquad (11.93)$$

Уравнение (11.60) нельзя упростить, так как член D_{ijk} включает в себя вторую частную производную $\partial^2 \mathbf{T}_0^p / (\partial q_i \partial q_k)$. Обычно влиянием центробежной и кориолисовой сил пренебрегают. Объясняется это тем, что оба эти члена зависят от скорости движения. А так как скорости в начале движения робота и при достижении цели обычно малы, то и влияние этих двух членов несущественно. Робот набирает скорость во время перемещения в пространстве, а поведение робота на траектории движения нами не рассматривается. Если рассматривать перемещение робота по заданной траектории, например, с целью избежать столкновений с различными объектами, то влиянием упомянутых выше двух членов пренебречь нельзя. Тогда их значения должны быть вычислены либо по уравнению (11.60), либо по методу Ньютона — Эйлера [13], представляющего собой алгоритм вычислений. Доказано, что этот алгоритм сходится [14—16]. Кроме того, Бейчи [6, 11], используя графоаналитический метод, показал, что для последних четырех звеньев шестизвенного манипулятора «Стэнфорд-*JPI*» $(n = 6)$, следующими членами можно пренебречь:

D_{333} D_{334} D_{335} D_{336} D_{344} D_{345} D_{346}
D_{356} D_{366}
D_{433} D_{434} D_{435} D_{436} D_{444} D_{446} D_{455} D_{466}
D_{533} D_{534} D_{535} D_{536} D_{555} D_{556} E_{566}
D_{633} D_{634} D_{635} D_{636} D_{644} D_{666}

Таким образом, если известна геометрическая конфигурация робота и проведен соответствующий анализ, можно упростить вычисления.

Как было упомянуто ранее, метод Ньютона — Эйлера представляет собой сходящийся вычислительный алгоритм. Сокращение времени вычислений возможно при параллельных вычислениях на многопроцессорной ЭВМ. Метод ветвей и границ, определяющий оптимальный порядок разделения вычислений между процессорами, разработан Лу и Линон [17]. По мере сокращения объема и роста скорости вычислений, становится возможным построить устройство управления роботом в реальном масштабе времени.

11.5. Отслеживание траектории многозвенным роботом

Если робот должен перемещаться по определенной траектории, то одной функцией устройства управления должно быть отслеживание траектории. Существуют два различных способа управления движением рабочего органа по заданной траектории: управление на уровне рабочего органа и управление на уровне звеньев. В обоих случаях требуется преобразование между декартовой системой координат и системой координат звеньев. В устройствах позиционного управления отслеживание траектории может быть достигнуто разбиением кривой в декартовых координатах на множество сегментов. Координаты конечных точек каждого сегмента преобразуются в систему координат звеньев, а затем осуществляется поточечное управление в координатах звена. Этот метод, о котором было упомянуто ранее в разд. 11.3, соответствует случаю 2 в табл. 11.1. Ниже будет приведено несколько примеров использования этого метода. Преобразуя декартовые координаты конечных точек всех сегментов траектории, мы строим n траекторий в соответствующих координатах звеньев, по одной для каждого из n звеньев. Если величины сегментов $[dp(t)'d\theta(t)']$ малы, то приращения смещений звеньев dq_i между двумя соседними точками также малы, так что $\sin dq_i \simeq dq_i$ и $\cos dq_i \simeq 1$. Таким образом, преобразование $f(\cdot)$, заданное уравнением (11.5), становится дифференциальным преобразованием, которое обычно линейно. Это преобразование описывается якобианом смещений, состоящим из тригонометрических функций смещений звена, заданных в системе координат звена, до выполнения дифференциального приращения смещений [18]. Можно выразить dq_i через dp и $d\theta$ аналитическим обращением якобиана. Но это затруднительно, так как матрица якобиана, как правило, сложна. Возможно применение численных методов, но они обычно требуют длительного времени. Кроме того, если робот достигает вырожденного положения, в котором решение dq_i не является единственным (т. е. существует несколько значений dq_i для одних и тех же dp и $d\theta$), матрица становится особой. Другой способ решения [18] — непосредственное дифференцирование уравнения (11.5), избегая обращения матрицы. Это возможно, так как для конкретного робота с известными параметрами функция преобразования f определена. Используя этот метод, можно приравнять dq_i к нулю, если таких приращений невозможно достигнуть из-за физических ограничений или если они не определены (т. е. решение единственно). При этом, как правило, происходят упрощения [18].

В большинстве случаев, последовательность опорных точек задается на известной траектории (например, по шву, вдоль которого должен проследовать рабочий орган робота при электрической сварке). Если управление осуществляется в координатах рабочего органа (случай 3, табл. 11.1), то он проводится по прямолинейным сегментам между соседними опорными точками, хотя в некоторых случаях траектория не обязательно является прямолинейной. Таким образом, в заданную траекторию вписывается кусочно-линейная траектория движения рабочего органа. Погрешность между этими двумя траекториями зависит от числа заданных опорных точек. Для достижения прямолинейного движения в декартовых координатах Уитни [19] несколько раз применил обращение якобиана для определения скорости движения звена. Пол [20] использовал другой подход с выбором дополнительных опорных точек на прямолинейных сегментах через заданные малые промежутки времени движения рабочего органа. Координаты этих точек во время движения рабочего органа преобразуются в систему

координат звеньев, что обеспечивает прямолинейное движение по сегментам траектории. Если уравнение (11.58) не упрощено (см. выше), то оба метода требуют значительных вычислений в реальном времени, что снижает верхнюю границу точности и ухудшает отслеживание траектории.

Чтобы избежать преобразования координат дополнительных опорных точек в реальном времени, можно использовать управление в координатах звеньев. Тэйлор [21] использовал предварительный выбор достаточного количества промежуточных точек на прямолинейных сегментах в декартовой системе координат с предварительным преобразованием координат этих точек в систему координат звеньев. Все пары соседних точек после преобразования координат соединяются отрезками прямых, по которым затем будет производиться управление движением звеньев. Таким образом, отпадает необходимость преобразования декартовых координат промежуточных точек. Однако прямолинейный сегмент в системе координат звеньев не всегда соответствует прямой линии в декартовых координатах. Возникает погрешность между прямолинейной траекторией в декартовых координатах и реальной траекторией, соответствующей прямолинейным сегментам в системе координат, связанной со звеном. Чтобы величина погрешности не превышала заданного значения, в декартовой системе координат берутся дополнительные промежуточные точки. И хотя в результате этого величина погрешности не превышает своей границы, но упомянутая ранее погрешность аппроксимации траектории отрезками прямой в декартовой системе координат по прежнему существует и не уменьшается. Как отмечалось выше, эта погрешность вызвана тем, что прямолинейные сегменты в декартовой системе координат вписаны в намеченную траекторию.

Чтобы уменьшить погрешность аппроксимации, можно строить траектории звеньев непосредственно по намеченной траектории в декартовых координатах, минуя промежуточную операцию по вписыванию прямолинейных сегментов. Намеченная траектория в декартовых координатах может быть преобразована в n траекторий звеньев (соответственно по одной для каждого звена), которые являются входной информацией в координатах звеньев для устройств управления. Возникает желание применить обращение якобиана. Однако преобразование определено на конечном числе точек. Поэтому, чтобы представить траекторию в декартовых координатах в виде n траекторий звеньев, надо сначала выбрать достаточное количество точек на траектории и преобразовать их координаты из декартовой системы координат в систему координат звеньев. Затем по совокупностям точек в координатах звеньев строятся некоторые кривые. В результате получаем n функций аппроксимации, каждая из которых аппроксимирует траекторию одного звена и является входной информацией для устройства управления звеном. Этот подход соответствует случаю 4 в табл. 11.1. Таким образом, чтобы построить n аппроксимирующих функций для звеньев, следует выбрать достаточное количество точек на первоначальной траектории и преобразовать их декартовые координаты в угловые смещения для n звеньев. Функция аппроксимации траектории звена проходит через точки, соответствующие тем, что были выбраны на декартовой траектории. Возможным решением этой задачи является применение сглаживающих полиномов наименьшего порядка [22]. Пол [23] и Финкель [24] провели расчет траектории методом интерполяции по выбранным точкам. Оба эти метода основаны на решении системы $3(N-1)$ или $4(N-1)$ линейных уравнений, где N — количество выбранных точек. Простой метод вычисления, требующий решения системы $N-2$ уравнений для построения для каждого звена сплайнов порядка $N-1$ [25], рассматривается ниже.

11.5.1. *Аппроксимация траекторий звеньев кубическими полиномами*

Положение и ориентация рабочего органа манипулятора могут быть заданы квадратной четырехмерной матрицей $\mathbf{H}(t)$ вида (11.1). Параметры положения звеньев, входящие в $\mathbf{H}(t)$ вычисляются соответственно структуре манипулятора. Один из примеров расчета параметров звена манипулятора ПУМА приведен в [3].

Пусть $\mathbf{H}_i = \mathbf{H}(t_i)$. Рабочий орган должен проследовать через N опорных точек, каждой из которых соответствует своя матрица $\{\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \ldots, \mathbf{H}_N\}$. Чтобы построить траектории звеньев, надо сперва преобразовать координаты N опорных точек в координаты векторов звеньев $[q_{11}, q_{21}, \ldots, q_{n1}]$, $[q_{12}, q_{22}, \ldots, q_{n2}]$, ..., $[q_{1N}, q_{2N}, \ldots, q_{nN}]$, где q_{ji} — смещение звена относительно точки с соответствующей матрицей $\mathbf{H}_i$. Затем для каждого звена строится траектория в виде кубического полинома, удовлетворяющего последовательности $q_{i1}, q_{i2}, \ldots, q_{iN}$. В этом разделе мы рассмотрим построение траектории для одного звена, поэтому нет необходимости указывать номер звена — j, и для простоты заменим q_{ji} на q_i.

Наша цель — используя кубические полиномы, построить траекторию движения звена, удовлетворяющую последовательности смещений в заданные моменты времени. Пусть $t_1 < t_2 < \ldots < t_{N-1} < t_N$ — заданная последовательность моментов времени. Пусть в начальный момент времени $t = t_1$ известно, что q_1 — смещение звена, v_1 — скорость звена и a_1 — ускорение звена; аналогично имеем q_N, v_N и a_N в момент времени $t = t_N$. Кроме того, известны смещения q_k в моменты времени $t = t_k$ для $k = 3, 4, \ldots, N-2$ по всей траектории движения звена. Значения смещений q_2 и q_{N-1} в двух дополнительных узлах не фиксируются, чтобы в дальнейшем установить ограничения при решении задачи. Пусть $Q_i(t)$ — полиномиальная функция третьей степени, определенная на временном интервале $[t_i, t_{i+1}]$. Построение траектории сводится к построению сплайна $Q_i(t)$ для $i = 1, 2, \ldots, N-1$, так чтобы удовлетворить заданным значениям смещений, скоростей и ускорений и чтобы функции смещения, скорости и ускорения были непрерывны на всем интервале времени $[t_1, t_N]$.

Так как функция $Q_i(t)$ — полином третьей степени, то ее вторая производная $Q_i''(t)$ должна быть линейной функцией от времени. Следовательно, $Q_i''(t)$ может быть записана в виде

$$Q_i''(t) = \frac{t_{i+1}-t}{h_i} Q_i''(t_i) + \frac{(t-t_i)}{h_i} Q_i''(t_{i+1}), \quad i = 1, 2, \ldots, N-1, \tag{11.94}$$

где $h_i = t_{i+1} - t_i$. Интегрируя $Q_i''(t)$ дважды при условии $Q_i(t_i) = q_i$ и $Q_i(t_{i+1}) = q_{i+1}$, получаем следующую функцию интерполяции

$$Q_i(t) = \frac{Q_i''(t_i)}{6h_i}(t_{i+1}-t)^3 + \frac{Q_i''(t_{i+1})}{6h_i}(t-t_i)^3 + \left[\frac{q_{i+1}}{h_i} - \frac{h_i Q_i''(t_{i+1})}{6}\right](t-t_i) + \left[\frac{q_i}{h_i} - \frac{h_i Q_i''(t_i)}{6}\right](t_{i+1}-t), \tag{11.95}$$

$$i = 1, 2, \ldots, N-1.$$

Из условия непрерывности скоростей имеем

$$Q_i'(t_i) = Q_{i-1}''(t_i), \quad i = 2, 3, \ldots N-1, \tag{11.96}$$

что приводит к следующим уравнениям:

$$\frac{h_{i-1}}{h_i} Q_{i-1}''(t_{i-1}) + \frac{2(h_i + h_{i-1})}{h_i} Q_i''(t_i) + Q_i''(t_{i-1}) = \frac{6}{h_i}\left[\frac{q_{i+1}-q_i}{h_i} - \frac{q_i - q_{i-1}}{h_{i-1}}\right], \tag{11.97}$$

$$i = 2, 3, \ldots, N-1.$$

Не установленные значения смещений для двух дополнительных точек могут быть выражены через начальное и конечное граничные значения смещений и $Q_1''(t_2)$, $Q_{N-2}'' \times (t_{N-1})$. А именно:

$$q_2 = q_1 + h_1 v_1 + \frac{h_1^2}{3} a_1 + \frac{h_1^2}{6} Q_1''(t_2); \tag{11.98}$$

$$q_{N-1} = q_N - h_{N-1} v_N + \frac{h_{N-1}^2}{3} a_N + \frac{h_{N-1}^2}{6} Q_{N-2}''(t_{N-1}). \tag{11.99}$$

Подставляя соотношения (11.98) и (11.99) в уравнение (11.97) получаем систему $(N-2)$ линейных уравнений с $(N-2)$ неизвестными $Q_i''(t_i)$ при $i = 2, 3, \ldots, N-1$:

$$\mathbf{A}\begin{bmatrix} Q_2''(t_2) \\ Q_3''(t_3) \\ \cdot \\ \cdot \\ Q_{N-1}''(t_{N-1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N-2)\text{-мерный} \\ \text{вектор-константа} \end{bmatrix}, \tag{11.100}$$

де

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & & & & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & & & \\ & a_{32} & a_{33} & a_{34} & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & \ddots & \\ 0 & & & & a_{N-2,\,N-3} & a_{N-2,\,N-2} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 3h_1 + 2h_2 + \frac{h_1^2}{h_2} & h_2 & & & & 0 \\ h_2 - \frac{h_1^2}{h_2} & 2(h_2+h_3) & h_3 & & & \\ & h_3 & 2(h_3+h_4) & h_4 & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & 2(h_{N-3}+h_{N-2}) & h_{N-2} - \frac{h_{N-1}^2}{h_{N-2}} & \\ 0 & & & h_{N-2} & 3h_{N-1} + 2h_{N-2} + \frac{h_{N-1}^2}{h_{N-2}} & \end{bmatrix}.$$

ужно отметить, что из условия непрерыв-ости ускорения следует $Q_i''(t_{i+1}) = Q_{i+1}'' \times (t_{i+1})$. Ленточная структура матрицы уп-ощает поиск неизвестных $Q_i''(t_i)$ системы равнений (11.100). Отметим, что получен-ое решение будет выражено через значе-ия интервалов времени и смещений веньев.

Установлено, что описанная задача оты-кания траектории имеет единственное ре-ение, т. е. матрица **A** в уравнении (11.100) е вырождена. Чтобы убедиться в этом, тметим, что значения h_i представляют со-ой интервалы времени и вследствие этого оложительны. Поэтому все строки матрицы истемы уравнений (11.100), кроме строки и $N-3$, удовлетворяют нераве-ству

$$|a_{ii}| > \sum_{j \neq i} |a_{ij}| \text{ для } i\text{-й строки.} \qquad (11.101)$$

Если $h_2 \geqslant h_1$ и $h_{N-2} \geqslant h_{N-1}$, то строка 2 строка $N-3$ также удовлетворяют не-авенству (11.101). И, следовательно, мат-ица **A** системы уравнений (11.100) строго енточная и невырожденная.

Если $h_1 > h_2$, то выполним следующую перацию над строками: вычтем значение трока 1) $\left(h_2 - h_1^2/h_2\right)/\left(3h_1 + 2h_2 + h_1^2/h_2\right)$ из строки 2 и, исключая a_{21}, получаем:

$$a_{22}' = \frac{h_1^2 - h_2^2}{3h_1 + 2h_2 + h_1^2/h_2} + 2(h_2 + h_3),$$
$$a_{23}' = h_3. \qquad (11.102)$$

Так как $h_1 > h_2$, имеем $|a_{22}'| > |a_{23}'|$. Аналогичный результат получаем для $h_{N-1} > h_{N-2}$, т. е. матрица **A** эквивалентна ленточной матрице. Следовательно, система уравнений (11.100) имеет единственное решение.

11.5.2. Устройство контурного управления в координатах звеньев

Когда намеченная траектория движения рабочего органа в декартовых координатах преобразована в соответствующий набор траекторий звеньев, необходимое управление движением по траектории может быть достигнуто отслеживанием траекторий звеньев в координатах звеньев (рис. 11.12). На этой схеме **q** и $\mathbf{q}_d$ — соответственно измеренные и ожидаемые величины смещений для n звеньев. Чтобы получить существующую вторую производную $\ddot{\mathbf{q}}$, константы k_1 и k_2 должны быть выбраны таким образом,

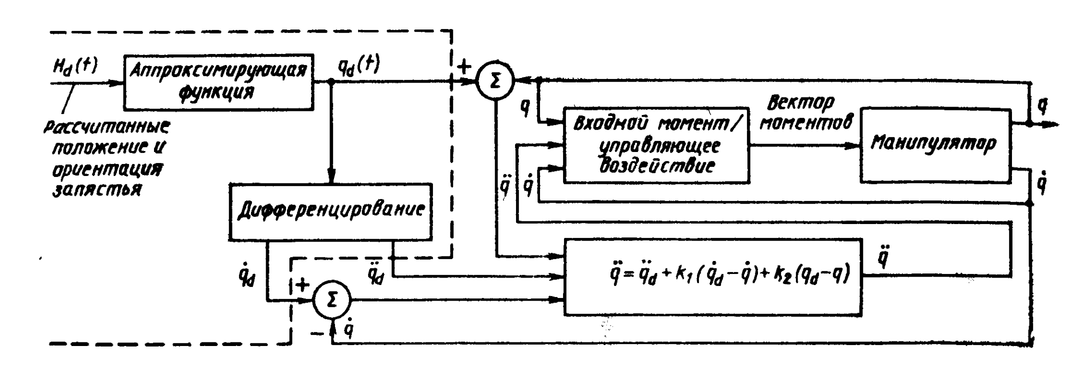


Рис. 11.12. Блок-схема устройства управления звеном

чтобы корни характеристического уравнения $\ddot{\varepsilon} + k_1\dot{\varepsilon} + k_2\varepsilon = 0$ имели отрицательную действительную часть. Блок, обозначенный на схеме «Входной момент — управляющее усилие» соответствует вычислению по уравнению (11.58) вектора моментов $\boldsymbol{\tau}$ для всех точек. Для повышения точности измерения **q** и $\dot{\mathbf{q}}$ должны производиться не реже, чем, например, 60 раз в секунду, как это и делается в существующих роботах (т. е. рабочая частота должна быть не ниже примерно пятикратного значения резонансной частоты робота). Это означает, что $\ddot{\mathbf{q}}$, как и $\boldsymbol{\tau}$, должны вычисляться 60 раз в секунду. Следовательно, скорость вычислений в рабочем режиме становится основной характеристикой устройства управления. Этот вопрос рассматривался ранее (см. разд. 11.4).

11.6. Устройство адаптивного управления

Для улучшения эксплуатационных качеств робота, так, например, для обеспечения равномерности движения, уменьшения отклонений реальной траектории движения от заданной, минимизации времени выполнения операций и т. д., обычно требуется рассчитывать поведение робота в динамике с использованием уравнений Лагранжа и Ньютона — Эйлера. Как было показано ранее, расчет моментов для звена в рабочем режиме является «узким местом» схемы управления. Другой метод — использование устройства адаптивного управления.

Янг [26] предложил схему манипулятора, основанную на теории переменных структур. Для применения этой схемы необходимо, чтобы траектория движения принадлежала ступенчатой поверхности, чего (для знакомых с теорией оптимального управления это известно) достаточно трудно добиться. Дубовский и Де Форгис [27] упростили эту задачу, воспользовавшись схемой адаптивного управления со сравнением текущих и эталонных параметров. Однако функционирование робота на высоких скоростях ими не рассматривается. Койво и Гью [28] для управления роботом по модели, описанной линейным дифференциальным уравнением с белым шумом Гаусса, применили самонастраивающийся регулятор Борнсона [29]. Ленингер и Ванг [30] и Волтерс и Байоми [31] предложили схожий метод с применением полюсного регулятора. Параметры вырабатывались итеративно исходя из критерия минимума дисперсии. Управляющие параметры (входной момент) рассчитывались по критерию минимизации средних отклонений траекторий звеньев от заданной траектории. И хотя решения уравнений Лагранжа или Ньютона — Эйлера удается избежать, время, затрачиваемое на итеративные вычисления в рабочем режиме, все-таки велико, даже при использовании измерений в двоичной системе. Кроме того, линейная модель не учитывает нелинейные взаимодействия между звеньями робота, в результате чего появляются нежелательные погрешности. Ли и Чанг [32] использовали похожую идею оценки параметров и возмущений в окрестности траектории движения манипулятора. Необходимость расчета динамики манипулятора с использованием уравнений Ньютона — Эйлера не ликвидирует упомянутого выше «узкого места» в вычислениях.

В этом разделе для повышения точности модели в дифференциальное уравнение вводится дополнительный квадратичный член, учитывающий воздействия центробежной силы. Применение дискретной модели облегчает процесс получения итеративных оценок и вычислений на ЭВМ. Все параметры оцениваются итеративно по критерию минимума дисперсии. Для ускорения вычислений

і обеспечения сходимости итерационного процесса используем метод стохастиче-ской аппроксимации Астрома и Эйкхоффа 34]. Входные моменты рассчитываются ис-ходя из критерия минимизации средних от-клонений от траектории движения.

11.6.1. Модель манипулятора с дискретным модельным временем

Рассмотрим динамическое уравнение Ла-гранжа для робота (11.58). Пусть $q_i(k)$ и $q_{im}(k)$ соответственно смещение i-го звена и его модели для $i = 1, 2, \ldots, n$ в момент времени k. Пусть также значения $q_i(k-\alpha)$ для $\alpha = 1, 2, \ldots, N$ получены в результате измерений, сделанных при заданных вели-чинах моментов звеньев $\tau_i(k-\alpha-1)$. Мы должны определить $\tau_i(k-1)$. С учетом не-линейности, обусловленной влиянием цен-тробежной силы, выбираем следующую мо-дель:

$$q_{im}(k) = a_i^0 + \sum_{\alpha=1}^{N} \left[a_i^\alpha q_i(k-\alpha) + b_i^\alpha \tau_i(k-\alpha)\right] + \sum_{\beta=1}^{N}\sum_{\gamma=1}^{N} c_i^{\beta\gamma} q_i(k-\beta) \times q_i(k-\gamma), \qquad (11.103)$$

где a_i^0, a_i^α, b_i^α и $c_i^{\beta\gamma} = c_i^{\gamma\beta}$ — параметры, которые следует определить. При движении робота параметры D_i, D_{ij} и D_{ijk} в уравне-нии (11.58) меняются. Предположим, что они меняются достаточно медленно, так что на интервале времени $[k, k+1]$ их можно считать постоянными. По этой же причине считаем постоянными значения параметров a_is, b_is и c_is. Хотя модель, описанная урав-нением (11.103), нелинейная, она не учиты-вает взаимодействия между звеньями. Но даже при этих допущениях оценить пара-метры достаточно сложно. Мы не можем ни определить, ни измерить величину $q_i(k)$ раньше, чем определим $\tau_i(k-1)$. Если в модели этой величине соответствует $q_{im}(k)$, то поверхность моделирования определяется как

$$\varepsilon_i(k) = q_i(k) - q_{im}(k). \qquad (11.104)$$

Так как значение $q_i(k)$ в момент времени k неизвестно, то неизвестна и $\varepsilon_i(k)$. Пред-положим, что ошибка подчиняется распре-делению Гаусса, некоррелирована, с нулевым средним и дисперсией σ_i^2. Тогда неизвест-ные параметры a_i^0, a_i^α, b_i^α и $c_i^{\beta\gamma}$ могут быть оценены по минимуму дисперсии, т. е. путем минимизации среднеквадратичной ошибки

$$J_i(k-1) = \sum_{\alpha=0}^{k-1} E\left[\varepsilon_i(\alpha)^2\right], \qquad (11.105)$$

где E обозначает ожидаемое значение.

11.6.2. Оценка параметров

Так как манипулятор описывается мо-делью (11.103), которая учитывает взаимо-действия между звеньями, то оценка пара-метров и расчет управляющих воздействий производятся отдельно для конкретного звена. Поэтому в данном разделе для уп-рощения записи опущены индексы i.

Для определения оценок существует не-сколько возможных способов.

Фильтрация по Кальману. Пусть $Q(k-1)$ есть $2N+1+(N+1)N/2$ — мерный вектор, заданный следующим образом:

$$Q'(k-1) = [1\, q(k-1) \ldots q(k-N)\, \tau(k-1) \ldots \tau(k-N)\, q(k-1)^2\, q(k-1)\, q(k-2) \ldots$$
$$\ldots q(k-1)\, q(k-N)\, q(k-2)^2\, q(k-2)\, q \times (k-3) \ldots q(k-N)^2], \qquad (11.106)$$

где $(\cdot)'$ получается транспонированием $(\cdot)$. Пусть $\mathbf{p}$ — вектор параметров той же раз-мерности, заданный следующим образом:

$$\mathbf{p}'(k) = [a^0 a^1 \ldots a^N b^1 \ldots b^N c^{11} c^{12} \ldots \ldots c^{1N} c^{22} \ldots c^{NN}]. \qquad (11.107)$$

Так как значения параметров предполага-ются постоянными, имеем

$$\mathbf{p}(k) = \mathbf{p}(k-1) = \mathbf{p}. \qquad (11.108)$$

Это уравнение параметров для системы без помех. Из соотношений (11.103) и (11.104) с использованием (11.106) и (11.107) полу-чаем следующее уравнение линейных изме-рений для $\mathbf{p}(k)$ с распределенным по Гаус-су белым шумом:

$$q(k) = \mathbf{Q}'(k-1)\,\mathbf{p} + \varepsilon(k). \qquad (11.109)$$

Система уравнений (11.108) и (11.109) опи-сывает дискретный фильтр Кальмана (см. [33]):

$$\hat{\mathbf{p}}(k_+) = \hat{\mathbf{p}}(k_-) + \mathbf{K}(k)\left[q(k) - Q'(k-1)\,\hat{\mathbf{p}}(k_-)\right]. \qquad (11.110)$$

Экстраполированная оценка параметров

$$\hat{\mathbf{p}}(k_-) = \mathbf{p}((k-1)_+). \qquad (11.111)$$

Вектор коэффициентов передачи Кальмана

$$\mathbf{K}(k) = \frac{\mathbf{P}(k_-)\,\mathbf{Q}(k-1)}{\mathbf{Q}'(k-1)\,\mathbf{p}(k_-)\,\mathbf{Q}(k-1) + \sigma^2}. \qquad (11.112)$$

Экстраполированная матрица погрешностей ковариации

$$\mathbf{P}(k_-) = \mathbf{P}[(k-1)_+]. \qquad (11.113)$$

Скорректированная матрица погрешностей ковариации

$$\mathbf{P}(k_+) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\,\mathbf{Q}'(k-1)]\,\mathbf{P}(k_+), \qquad (11.114)$$

где $\mathbf{I}$ — единичная матрица, и начальные условия равны:

$$\mathbf{E}[\mathbf{p}(0)] = \hat{\mathbf{p}}(0) = \mathbf{E}[\mathbf{p}]; \qquad (11.115)$$

$$\mathbf{E}[\{\mathbf{p}(0) - \hat{\mathbf{p}}(0)\}\{\mathbf{p}(0) - \hat{\mathbf{p}}(0)\}'] = \mathbf{P}(0). \qquad (11.116)$$

Теперь рассмотрим другое представление системы без шума и описывающие ее урав-нения для параметров и линейных измере-ний. Пусть

$$\rho'(k-1) = [1\, q(k-1) \ldots \ldots q(k-N)\, \tau(k-1) \ldots \tau(k-N)], \qquad (11.117)$$

$(2n+1)$-мерный вектор параметров и

$$\Phi = \begin{matrix} a^0 & \frac{a^1}{2} & \ldots & \frac{a^n}{2} & \frac{b^1}{2} & \ldots & \frac{b^n}{2} \\ \frac{a^1}{2} & c^{11} & \ldots & c^{1n} & 0 & \ldots & 0 \\ \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \frac{a^n}{2} & c^{n1} & \ldots & c^{nn} & 0 & \ldots & 0 \\ \frac{b^1}{2} & 0 & \ldots & 0 & 0 & \ldots & 0 \\ \frac{b^n}{2} & 0 & \ldots & 0 & 0 & \ldots & 0 \end{matrix} \qquad (11.118)$$

постоянная матрица параметров размер-ностью $(2n+1)$ на $(2n+1)$. Тогда из со-отношений (11.103), (11.104), (11.117) и (11.118) получаем:

$$q(k) = \rho'(k-1)\,\Phi\rho(k-1) + \varepsilon(k). \qquad (11.119)$$

Это скалярное уравнение. Пусть $\rho^+(k-1) = [\rho'(k-1)\rho(k-1)]^{-1}\rho'(k-1)$ пред-ставляет псевдообращение Мура — Пенроза [35] вектора $\rho(k-1)$. Умножив уравнение (11.119) на $\rho^+(k-1)$, получаем:

$$q(k)\,\rho^+(k-1) = \rho'(k-1)\,\Phi\rho(k-1) \times \rho^+(k-1) + \varepsilon(k)\,\rho^+(k-1). \qquad (11.120)$$

Теперь $\rho^+\rho = [\rho'\rho]^{-1}\rho'\rho = 1$ и $\rho\rho^+ = [\rho'\rho]^{-1}\rho\rho' \neq \mathbf{I}$. Тогда для произвольного вектора $\mathbf{c}$ имеем $\|\rho\rho^+\mathbf{c}\| \leqslant \mathbf{c}$ и решение уравнения

$$q(k)\,\rho^+(k-1) = \rho'(k-1)\,\Phi + \varepsilon(k)\,\rho^+(k-1) \qquad (11.121)$$

представляет собой минимальное нормиро-ванное решение уравнения (11.120). Для решения поставленной задачи используем уравнение (11.121), представляющее собой уравнение для линейных измерений в пара-метрах матрицы Φ. Уравнение для пара-метров в системе без шума имеет вид:

$$\Phi(k) = \Phi(k-1) = \Phi \qquad (11.122)$$

Уравнения (11.121) и (11.122) описывают ту же систему, что и уравнения (11.108) и (11.109), т. е. полученные фильтры Каль-мана эквивалентны.

Оценка по методу наименьших квадратов. Доказано (см. [34]), что путем алгебраиче-ских преобразований можно получить урав-нение для наименьшей квадратичной оценки непосредственно из фильтра Кальмана сле-дующим образом:

$$\hat{\mathbf{p}}(k) = \hat{\mathbf{p}}(k-1) + \mathbf{\Gamma}(k-1)[q(k) - \mathbf{Q}'(k-1)\,\hat{\mathbf{p}}(k-1)], \qquad (11.123)$$

где вектор

$$\mathbf{\Gamma}(k-1) = \frac{\mathbf{P}(k-1)\,\mathbf{Q}(k-1)}{[\sigma^2 + \mathbf{Q}'(k-1)\,\mathbf{P}(k-1)\,\mathbf{Q}(k-1)]} \qquad (11.124)$$

и матрица ковариации

$$\mathbf{P}(k) = [\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}(k-1)\,\mathbf{Q}'(k-1)]\,\mathbf{P}(k-1). \qquad (11.125)$$

Стохастическая аппроксимация. Для ре-шения рассматриваемой задачи оба описан-ных выше метода (фильтрации по Каль-ману и наименьших квадратов) требуют вы-полнения большого объема вычислений. Их можно сократить, использовав метод стоха-стической аппроксимации с заменой уравне-ния (11.124) на уравнение из [34]

$$\mathbf{\Gamma}(k-1) = \mathbf{A}\mathbf{Q}(k-1)/(k-1), \qquad (11.126)$$

где $\mathbf{A}$ — положительно определенная мат-рица, или единичная (для простоты). Из [37] известно, что, если в качестве $\mathbf{\Gamma}(k-1)$ используется (11.126), сходимость оценок $\mathbf{p}(k)$ обеспечена. Хотя применение алгорит-ма стохастической аппроксимации всегда приводит к сокращению вычислений и

гарантирует сходимость, точность полученных оценок ниже, чем полученных по методу наименьших квадратов.

11.6.3. Устройство контурного управления

Пусть $q_{id}(t)$ — ожидаемое смещение звена i при любых t. В идеале желательно иметь отклонение реальных смещений i-го звена $q_i(t)$ от ожидаемых $q_{id}(t)$, равное нулю при любых t. Это достаточно сложно. Так как рассматривается динамическая модель манипулятора дискретного типа с учетом погрешности, моделируемой по распределению Гаусса, и с определением значений моделируемых параметров исходя из минимизации моделируемой погрешности, то входные воздействия в режиме отслеживания траектории определяются из критерия минимальных средних отклонений. Таким образом, ограничения, накладываемые на прохождение по траектории, достаточно свободны.

Пусть в любой момент времени $q_{id}(k)$ — ожидаемое смещение i-го звена. Если реальное смещение $q_i(k-1)$ в момент времени $k-1$ известно, то $q_i(k)$ определяется через момент привода i-го звена $\tau_i(k-1)$. Снова опустим индекс i для упрощения записи формул. Следовательно, $\tau(k-1)$ может быть получено путем минимизации условного математического ожидания:

$$J[\tau(k-1)] = E\{[q_d(k) - q(k)]^2 \mid q(k-1)\} \tag{11.127}$$

Из соотношения (11.109), принимая во внимание, что среднее значение $\varepsilon_i(k)$ равно нулю, получаем:

$$J[\tau(k-1)] = E\{[q_d(k) - \mathbf{Q}'(k-1)\mathbf{p} + \varepsilon(k)]^2] \mid q(k-1)\} = [q_d(k) - \mathbf{Q}'(k-1)\mathbf{p}]^2 + \sigma^2, \tag{11.128}$$

которое имеет производную

$$\frac{dJ[\tau(k-1)]}{d\tau(k-1)} = 2b^1[q_d(k) - \mathbf{Q}'(k-1)\mathbf{p}]. \tag{11.129}$$

Так как $b_i^1 \neq 0$, нулевое значение производной означает, что

$$\mathbf{Q}'(k-1)\mathbf{p} = q_d(k) \tag{11.130}$$

или

$$\tau(k-1) = \Big\{ q_d(k) - a^0 - a^1 q(k-1) - \sum_{\alpha=2}^{N} [a^\alpha q(k-\alpha) + b^\alpha \tau(k-\alpha)] - \sum_{\beta=1}^{N}\sum_{\gamma=1}^{N} c^{\beta\gamma} q(k-\beta)\, q(k-\gamma) \Big\} \Big/ b^1. \tag{11.131}$$

В уравнении (11.131) значения параметров a^α, b^α и $c^{\beta\gamma}$ оценки получены в разд. 11.6.2. Рассчитанные управляющие воздействия используются на непосредственно следующем за расчетным интервалом времени, что обеспечивает устойчивость системы.

11.6.4. Ожидаемая траектория движения звена

В действительности ожидаемая траектория манипулятора или рабочего органа манипулятора задается в декартовых координатах. Очевидно, можно определить соответствующие смещения звеньев $q_{id}(k)$, используя преобразование обратного якобиана. Если рабочая частота изменяется, то значение q_i в промежутке между моментами времени k и $k+1$ может быть определено путем интерполяции. Для хранения $q_{id}(k)$ для всех k требуется большой объем памяти ЭВМ. Этого удается избежать, использовав предварительное преобразование трехмерных декартовых координат траекторий в n-мерные траектории звеньев, заданные аппроксимирующими сглаживающими функциями. Эти вопросы были рассмотрены ранее в разд. 11.5.1.

Полная схема процесса управления представлена на рис. 11.13. На нем изображены информационные связи для одного звена на протяжении одного периода управления. Из схемы видно, что как вычисление оценок параметров модели, так и расчет управляющих воздействий должны производиться в рабочем режиме во время функционирования манипулятора. Скорость вычислений очень важна, так как определяет верхнюю границу рабочей частоты; чем больше частота, тем точнее будет управление.

В предыдущих разделах были рассмотрены следующие методы получения оценок: Кальмана, наименьших квадратов и стохастической аппроксимации. При их использовании приходится выбирать между скоростью и точностью. Метод стохастической

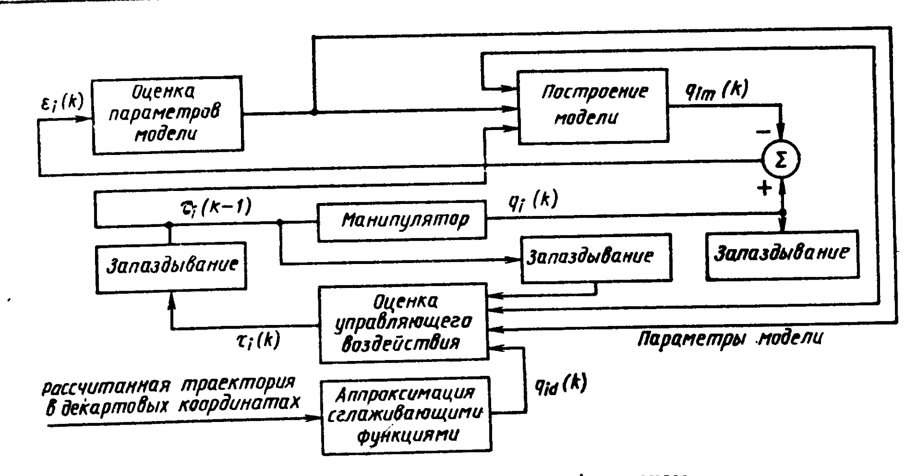


Рис. 11.13. Общая схема одного периода управления i-м звеном

аппроксимации предпочтительней, так как требует меньшего времени вычислений и итерационный процесс всего сходится. Но полученные в результате оценки имеют меньшую точность. Модель механического манипулятора включает в себя квадратичную составляющую, учитывающую воздействия центробежных сил. Ее назначение — оценить ошибку моделирования (за счет увеличения вычислений). Разработчику системы управления приходится делать выбор применительно к особенностям выполняемых роботом операций.

11.7. Устройство управления с силомоментной обратной связью

Общепризнано, что при проектировании телеуправляемых устройств (т. е. удаленных манипуляторов) для улучшения скоростных качеств, точности и запаса прочности следует использовать в устройстве управления возможности моментного загружения [38]. Проиллюстрировать это можно на примере соединения двух деталей при сборке. Если зазор между соединяемыми деталями очень мал, то обеспечивать соединение за счет высокой точности манипулятора непрактично. Альтернативным решением является сочетание в устройстве управления позиционного и силового управления с учетом позиционных ограничений, вытекающих из геометрических ограничений выполняемой операции. Гоерц и Бевилакью [39] в 1952 г. выдвинули идею устройства позиционного управления для телеуправляемых устройств с моментным загружением. Для этого требуется наличие позиционных и моментных датчиков как на входе, так и на выходе исполнительного устройства. В такой системе управления с двумя цепями обратной связи задача обеспечения устойчивости становится довольно сложной.

В литературе описан ряд схем силового управления манипулятором, не требующих непосредственных измерений сил с помощью датчиков. В 1969 г. Уитни [19] разработал схему управления скоростью приведенных перемещений. Она позволяет вычислять величины моментов звеньев манипулятора, позволяющие достигнуть следующего ожидаемого положения, рассчитанного по дифференциальным аппроксимациям перемещений. Для создания замкнутой системы управления и расчета моментов требуется обращение матрицы якобиана со всеми вытекающими сложностями вычислительного плана. Лу, Волкер и Пол [40] распространили идею Уитни на приведенные ускорения, что позволило плавно изменять скорости. У этого метода тот же недостаток — необходимость обращения якобиана. По предложенному Ину [41] в 1971 г. методу предполагается, что информация о нагрузке до начала движения манипулятора отсутствует. Программное обеспечение позволяет использовать силовое управление для некоторых звеньев. Для этих звеньев предполагается, что величина внешнего момента должна быть пропорциональна времени стабилизации измеряемой позиционной погрешности. Затем на основании этой информации корректируется входной момент, что ведет к снижению величины погрешности. Недостаток этого метода — необходимость выбора пользователем звеньев с силовым управлением. Пол [23] предложил в 1972 г. использовать уравнение Лагранжа для предварительного расчета необходимых величин

моментов для каждого звена. Однако если манипулятор приводится в движение, то его геометрическая конфигурация (и требуемые величины моментов для каждого звена) меняются. И если рассчитанная требуемая величина момента не будет скорректирована, то это может привести к погрешностям. Невинс и Уитни [42] в 1973 г. выдвинули идею использования датчика вектора сил. Этот датчик представляет собой очувствленное запястье с тремя линейными и тремя угловыми тензометрами [43]. В 1976 г. Пол и Шимано [44] разработали устройство податливости, включающее в себя очувствленное запястье, дающее возможность измерять приложенные к нему силы и моменты в декартовой системе координат при работе системы. Обсуждение устройств податливости и очувствленного запястья Шейнмана на основе мальтийского креста приводится Шимано [45]. Получение информации о моментах звеньев с датчиков производится через вычисление матрицы размером 6 на 8.

В 1974 г. в лаборатории Дрейпера были проведены эксперименты на гидравлическом устройстве (с одной степенью подвижности) с силовыми, позиционными и скоростными обратными связями. Устройство управления использовало линейную модель. На нелинейных элементах переключательного типа был реализован только силовой датчик. Было также продемонстрировано шестизвенное сборочное устройство с силомоментным управлением. Исследование динамических моделей и их устойчивости было проведено Уитни в 1977 г.

Современные силовые устройства управления с использованием запястья Шейнмана были впервые применены в 1979—1981 гг. Крейгом, Райбертом [48, 49] и Солсбери [50]. В устройстве Крейга и Райберта использованы теоретические результаты Мейсона [51] по естественным и искусственным ограничениям. Оно содержит две независимые замкнутые цепи позиционного и силового управления. Солсбери применил, кроме того, нелинейное устройство для уменьшения предельного избыточного коэффициента усиления, вызванного большими силовыми погрешностями из-за случайных столкновений. Всякий раз при настройке требуется выполнять преобразование якобиана системы координат, так как сигнал с датчиков на запястье связан с декартовой системой координат.

Несколько позднее, в 1980 г., Ву и Пол [52] провели эксперименты на однозвенном манипуляторе с датчиком. Использовалась строго линейная модель. Было установлено, что силомоментная система управления звеном имеет большое усиление и широкий частотный диапазон. При применении этой схемы удалось избежать сложностей, связанных с вычислениями дифференциальных аппроксимаций и обеспечить быстроту реакции, так как использовалась замкнутая на звене цепь обратной связи, построенная на элементах аналогового типа. На основании экспериментов Ву и Пола [52], Лу, Фишером и Полом [5] были заново спроектированы первые два звена манипулятора Стэнфордского университета (см. рис. 11.2). Были применены силомоментные датчики и связанные с ними электронные элементы. Результаты экспериментов на модифицированном манипуляторе и подробный их анализ приведены в [5]. В частности, в статье приводятся следующие данные. Штанга третьего звена была максимально выдвинута на расстояние 850 мм от конца штанги до линии центра выходного вала звена 2. На конце штанги потребовалось приложить среднее усилие 9 Н для преодоления чисто механического момента трения на каждом из двух звеньев. При использовании силомоментной обратной связи в цепи управления удалось уменьшить среднее усилие с 9 до 0,3 Н. Таким образом, эффективный момент трения для каждого звена был снижен до 25 кг на мм.

11.8. Заключение

Для промышленных роботов, назначение которых определяется набором обычных заданий с использованием синхронизации, устройства управления могут проектироваться стандартными методами с учетом двух параметров: затухания и собственной резонансной частоты. Для отдельных звеньев путем предварительной компенсации можно уменьшить статическую позиционную погрешность и устранить скоростную погрешность и погрешность от влияния центробежной силы. В многозвенных устройствах управления априорная компенсация требует учета силовых взаимодействий между звеньями. Однако с этим связаны определенные вычислительные сложности, в связи с чем применяется аппроксимация или упрощения.

В случае отслеживания траектории управление может осуществляться либо на уровне рабочего органа, либо на уровне звеньев. В любом случае необходимы аппроксимация и преобразование координат между декартовой системой координат и системой координат звеньев. Во избежание преобразований в реальном времени, траектории звеньев могут быть предварительно аппроксимированы сглаживающими функциями. Приходится выбирать между точностью и скоростью вычисления.

Чтобы избежать расчета динамики робота с использованием уравнений Лагранжа и Ньютона — Эйлера, применяют дискретные модели робота и устанавливают значения параметров исходя из критерия минимизации дисперсии или методом стохастической аппроксимации. При этом опять приходится выбирать между точностью управления и скоростью вычислений.

При использовании робота в промышленной сборке, основной задачей является согласование отдельных операций. Промышленные роботы не имеют прецизионного позиционного управления. Использование силомоментных датчиков позволяет роботу выполнять множество трудоемких работ, при которых позиционное управление неэффективно. Использование силомоментных датчиков позволяет также компенсировать механическое трение, что определяет рост их применения в современных промышленных роботах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Luh, J. Y. S., An Anatomy of Industrial Robots and Their Controls, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 28, No. 2, February 1983, pp. 133—153.
2. Roberts, L. G., *Homogeneous Matrix Representation and Manipulation of N-Dimensional Constructs*, Lincoln Laboratory Document, No. MS 1045, MIT, 1965.
3. Paul, R. P., Shimano, B., and Mayer, G. E., Kinematic Control Equations for Simple Manipulators, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 11, No. 6, June 1981, pp. 449—455.
4. Scheinman, V. D., *Design of a Computer Controlled Manipulator*, A. I. Memo 92, Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, June 1969.
5. Luh, J. Y. S., Fischer, W. D., and Paul, R. P. C., Joint Torque Control by a Direct Feedback for Industrial Robots, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 28, No. 2, February 1983, pp. 153—161.
6. Bejczy, A. K., *Robot Arm Dynamics and Control*, Technical Memorandum 33—669, Jet Propulsion Laboratory, February 1974.
7. Book, W. J., Maizza-Neto, O., and Whitney, D. E., Feedback Control of Two Beam, Two Joint Systems with Distributed Flexibility, *ASME Transactions, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 97, No. 4, December 1975, pp. 424—431.
8. Asada, H. T. and Takeyama I., *Control of a Direct-Drive Arm*, Report CMU-RI-TR-82-4, Robot Institute, Carnegie-Mellon University, March 9, 1982.
9. Asada, H. and Youcef-Toumi, K., Analysis and Design of Semi-direct-drive Robot Arms, Proc. 1983 American Control Conference, Vol. 2, June 22—24, 1983, San Francisco, pp. 757—764.
10. Paul, R. P., *Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1981.
11. Bejczy, A. K. and Paul, R. P., Simplified Robot Arm Dynamics for Control *Proceedings of 20th IEEE Conference on Decision and Control*, December 16—18, 1981, San Diego, California, pp. 261—262.
12. Luh, J. Y. S. and Lin, C. S., Automatic Generation of Dynamic Equations for Mechanical Manipulators, *Proceedings of Joint Automatic Control Conference*, June 17—19, 1981, Charlottesville, Virginia, pp. TA-2D.
13. Luh, J. Y. S., Walker, M. W., and Paul, R. P. C., On-line Computational Scheme for Mechanical Manipulators, *ASME Transactions, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*. Vol. 102, No. 2, June 1980, pp. 69—76.
14. Hollerbach, J. M., A Recursive Lagrangian Formulation of Manipulator Dynamics and a Cooperative Study of Dynamics Formulation Complexity, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 10, No. 11, November 1980, pp. 730—736.
15. Silver, W. M., On the Equivalence of Lagrangian and Newton-Euler Dynamics for Manipulators, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 1, No. 2, Summer 1982, pp. 60—70.
16. Turney, J. L., Mudge, T. N. and Lee, C. S. G., *Connection between Formulations of Robot Arm Dynamics with Applications to Simulation and Control*, Report RSD-TR-4-82, Robot System Division, University of Michigan, November 1981.
17. Luh, J. Y. S. and Lin, C. S., Scheduling of Parallel Computation for a Computer-Controlled Mechanical Manipulator, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 12, No. 2, March/April 1982, pp. 214—234.

18. Paul, R. P., Shimano, B., and Mayer, G. E., Differential Kinematic Control Equations for Simple Manipulators, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 11, No. 6, June 1981, pp. 456—460.
19. Whitney, D. E., Resolved Motion Rate Control of Manipulators and Human Prostheses, *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, Vol. 10, No. 2. June 1969, pp. 47—53.
20. Paul, R., Manipulator Cartesian Path Control, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 9, No. 11, November 1979, pp. 702—711.
21. Taylor, R. H., Planning and Execution of Straight Line Manipulator Trajectories, *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 23, No. 4, July 1979. pp. 424—436.
22. Ahlberg, H. H. et al. *The Theory of Splines and Their Applications*, Academic Press, New York, 1967.
23. Paul, R. C., *Modeling, Trajectory, Calculation and Servoing of a Computer Controlled Arm*, A. I. Memo 177, Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, September 1972.
24. Finkel, R. A., *Constructing and Debugging Manipulator Programs*, A. I. Memo 284, Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, August 1976.
25. Lin, C. S., Chang, P. R., and Luh, J. Y. S., Formulation and Optimization of Cubic Polynomial Joint Trajectories for Mechanical Manipulators, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1983, Vol. 28, No. 12, December 1983, pp. 1066—1074.
26. Young, K. K. D., Controller Design for a Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 8, No. 2, February 1978, pp. 101—109.
27. Dubowsky, S. and DesForges, D. T., The Application of Model-Referenced Adaptive Control to Robotic Manipulators, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Transactions of ASME*, September 1979, pp. 191—200.
28. Koivo, A. J. and Guo, T. H., Control of Robotic Manipulator with Adaptive Controller, *Proceedings 20th IEEE Conference on Decision and Control*, San Diego, California, December 16—18, 1981, pp. 271—276.
29. Borison, U., Self-Tuning Regulators for a Class of Multivariable Systems, *Automatica*, Vol. 15, 1979, pp. 209—215.
30. Leininger, G. G. and Wang, S. P., Pole Placement Self-Tuning Control of Manipulators, Preprints of *IFAC Symposium on Computer-Aided Design of Multivariable Technology Systems*, September 15—17, 1982, West Lafayette, Indiana, pp. 27—29.
31. Walters, R. G. and Bayoumi, M. M., Application of a Self-Tuning Pole-Placement Regulator to an Industrial Manipulator, *Proceedings of 21st IEEE Conference on Decision and Control*, Vol. 1, December 8—10, 1982, Orlando, Florida, pp. 323—329.
32. Lee, C. S. G. and Chung, M. J., An Adaptive Control Strategy for Computer-Based Manipulators, *Proceedings of 21st IEEE Conference on Decision and Control*, Vol. 1, December 8—10, 1982, Orlando, Florida, pp. 95—100.
33. Gelb, A., Kasper, J. F., et al. *Applied Optimal Estimation*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1974.
34. Astrom, K. J. and Eykhoff, P., System Identification — A Survey, *Automatica*, Vol. 7, 1971, pp. 123—162.
35. Albert, A., *Regression and the Moore-Penrose Pseudoinverse*, Academic Press, New York, 1972.
36. Rao, C. R. and Mitra, S. K., *Generalized Inverse of Matrices and Its Applications*, Wiley, New York, 1971.
37. Albert, A. E. and Gardner L. A. *Stochastic Approximation and Nonlinear Regression*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1967.
38. Goertz, R. C., Fundamentals of General Purpose Remote Manipulators, *Nucleonics*, Vol. 10, No. 11, November 1952, pp. 36—42.
39. Goertz, R. C. and Bevilacqua, F., A Force-Reflecting Positional Servomechanism, *Nucleonics*, Vol. 10, No. 11, November 1952, pp. 43—55.
40. Luh, J. Y. S., Walker, M. W., and Paul, R. P. C., Resolved-Acceleration Control of Mechanical Manipulators, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 25, No. 3, June 1980, pp. 468—474.
41. Inoue, H., Computer Controlled Bilateral Manipulator, *Bulletin of Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 14, No. 69, March 1971, pp. 199—207.

42. Nevins, J. L. and Whitney, D. E., The Force Vector Assembler Concept, *Proceedings of 1st International Conference on Robots and Manipulator Systems*, Udine, Italy, September 1973.
43. Nevins, J. L., Whitney, D. E., et al., *Exploratory Research in Industrial Modular Assembly*, Sixth Report, Charles Stark Draper Laboratory, MIT, September 1977 to August 1978, pp. 112—120.
44. Paul, R. and Shimano, B., Compliance and Control, *Proceedings of Joint Automatic Control*, 1976, San Francisco, pp. 694—699.
45. Shimano, B. E., *The Kinematic Design and Force Control of Computer Controlled Manipulators*, A. I. Memo 313, Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, March 1978.
46. Jilani, M. A., Force Feedback Hydraulic Servo for Advance Automation Machines, SM Thesis, Mechanical Engineering Department, MIT, November 1974.
47. Whitney, D. E., Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions, *ASME Transactions: Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 99, No. 2, June 1977, pp. 91—97.
48. Craig, J. J. and Raibert, M. H., A Systematic Method of Hybrid Position/Force Control of a Manipulator, *Proceedings 3rd International Computer Software and Applications Conference*, Chicago, November 6—8, 1979, pp. 446—451.
49. Raibert, M. H. and Craig, J. J., Hybrid Position/Force Control of Manipulators, *ASME Transactions: Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 103, No. 2, June 1981, pp. 126—133.
50. Salisbury, J. K., Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates, *Proceedings 19th IEEE Conference on Decision and Control*, Vol. 1, December 10—12, 1980, Albuquerque, New Mexico, pp. 95—100.
51. Mason, M. T., Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 11, No. 6, June 1981, MIT, April 1979, pp. 418—432.
52. Wu, C. H. and Paul, R. P., Manipulator Compliance Based on Joint Torque Control, *Proceedings 19th IEEE Conference on Decision and Control*, Vol. 1, December 10—12, 1980, Albuquerque, New Mexico, pp. 88—94.

Список дополнительной литературы

Cristafulli, D. M., Loh H. H., and Murphy, J. F., The Evolution of a New Industrial Robot Controller from User Specifications to Commercial Product, *SME Paper* No. MR76-607, 1976.
Folin, J, Leary, R., and Plonsky, B., Implementation of a Smart Minicomputer Based Robotic control system, *Proceedings of the Robot 8 Conference*, Detroit, Michigan, June 1984.
Girod, G. F., Utilization of Microprocessors in Robot Automation Systems, *Proceedings Robot VI*, Detroit, Michigan, March 1982, pp. 565—589.
Hohn, R. R., Robot Control Systems and Applications, *International Automatic Control Conference*, Denver, Colorado, June 1979, pp. 750—753.
Koren, Y. and Ulsoy, G., Control of DC Servo-Motor Driven Robots, *Proceedings Robot VI*, Detroit, Michigan, March 1982, pp. 590—602.
Kreinin, G. V., Pneumatic Drives for Industrial Robots, *Machines and Tooling*, Vol. 49, No. 7, 1978, pp. 31—35.
Lundstrom, G., Industrial Robots and Fluid Control Systems, *Industrial Robot*, Vol. 1, No. 6, December 1974, pp. 264—270.
Martin, M. and Menche, H., Electronic Control and Electrical Servomechanism for Industrial Robots, *Proceedings 4th I. S. I. R.*, Tokyo, Japan, November 1974, pp. 339—347.
Resnick, B. J., Robot Interface: Switch Closure and Beyond, *Proceedings Robot II*, November 1978.
Skidmore, M. P., Computer Techniques Used in Industrial Robots, *Industrial Robot*, Vol. 6, No. 4, December 1979, pp. 183—187.
Snyder, W. E. and Mian, M., Microcomputer Control of Manipulators, *Proceedings 9th I. S. I. R.*, Washington, D. C., March 1979, pp. 423—435.

Глава 12
РОБОТОТЕХНИКА И ЧИСЛОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Й. Корен, Технологический институт Израиля, г. Хайфа, Израиль

12.1. Введение

Современные станки с числовым программным управлением (ЧПУ) во многом схожи с промышленными робототехническими системами. И в тех, и в других движение исполнительного устройства, выполняющего некоторую операцию, осуществляется с помощью управляемых перемещений устройства по степеням подвижности (рис. 12.1). Станки с ЧПУ чаще всего выполняют операции сверления, фрезерования, шлифования, точения; промышленные роботы — окраску, сварку, сборку, перемещения. В системе с ЧПУ в качестве исполнительного устройства чаще всего выступает станок, в робототехнике — манипулятор. Как в станке с ЧПУ, так и в роботе перемещение по любой из степеней подвижности осуществляется раздельными приводами с замкнутыми системами сервоуправления. В качестве привода могут использоваться электродвигатели постоянного тока, гидроцилиндры, шаговые электродвигатели. Конкретный вариант выбирается в зависимости от требуемой мощности станка или робота (см. часть 2 настоящего справочника).

И в станках с ЧПУ, и в роботах траектория движения рабочего органа формируется координированными перемещениями по нескольким степеням подвижности. Рабочий орган станка — металлорежущий инструмент (резец, сверло, фреза), робота — захват, сварочная головка, головка для распыления краски. Под степенью подвижности станка с ЧПУ понимают степень подвижности перемещения инструмента относительно обрабатываемой детали. Такие перемещения осуществляются с помощью кареток и направляющих станка. Три основные степени подвижности инструмента (оси) обозначаются X, Y и Z. У обрабатывающих центров X может совпадать с направлением движения слева направо, Y с направлением движения сверху вниз и Z — с направлением движения в глубину.

При использовании станков с ЧПУ информация, необходимая для изготовления той или иной детали, хранится на перфоленте и называется программой обработки детали. Аналогом программы обработки детали в робототехнике является программа выполнения задания. Программа обработки детали представлена в виде совокупности блоков, где каждый блок содержит данные, соответствующие выполнению одного технологического перехода. В блоке в закодированной форме содержатся все данные, необходимые для изготовления некоторого сегмента детали: длина обрабатываемого сегмента, скорость резания, скорость подачи и т. д. Размерная информация (длина, ширина, радиусы отверстий) и топология детали (контуры и составляющие их элементы — отрезки и дуги) берутся из чертежа. По каждой из степеней подвижности (X, Y и остальным) размеры задаются отдельно. Скорости резания и подачи, а также необходимость использования вспомогательных функций (включение и выключение подачи охлаждающей эмульсии, смена направления вращения шпинделя, зажимание и освобождение детали, переключение передач) определяются из заданных допусков на обработку и чистоты поверхности [1—3].

По сравнению с обычными станками станок с ЧПУ не требует выполнения каких-либо операций вручную. При работе на обычном станке оператор перемещает режущий инструмент по требуемой траектории с помощью специальных маховиков. Фасонные поверхности выполняют «на глаз», что требует большого опыта. От оператора станка с ЧПУ не требуется навыков опытного станочника. В его функции входит слежение за станком, обслуживание считывателя перфоленты, установка деталей на станок и снятие их по завершении обработки. Выполнение всех интеллектуальных действий «берет на себя» программа обработки детали. Тем не менее, поскольку оператор работает со сложным и дорогим оборудованием, обязательными требованиями к нему являются высокая квалификация, логическое мышление и способность разобраться в различных ситуациях.

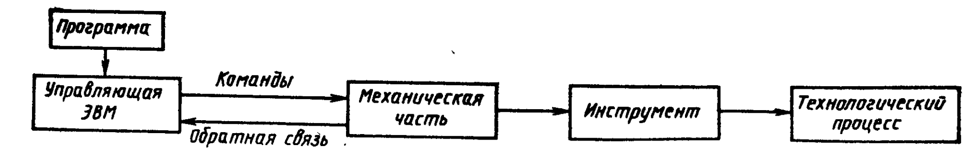


Рис. 12.1. Структурная схема производственной системы

Программы обработки деталей для станков с ЧПУ составляют программисты-технологи. Программист-технолог должен обладать достаточно высокой квалификацией в области конструкторской и технологической подготовки производства. Необходимо, чтобы он хорошо разбирался в металлорежущих инструментах, охлаждающих эмульсиях, проектировании оснастки, технологических процессах и возможностях станков с ЧПУ — без этого невозможно составить оптимальную последовательность операций. Программы обработки деталей составляются вручную или с использованием систем автоматизации разработки программ и языков для станков с ЧПУ (например, с помощью языка АПТ).

В состав современных устройств числового управления входит специализированная мини- или микроЭВМ, на которую возложены обработка данных и управление. В отличие от специализированных устройств управления (ЧПУ типа *NC*) такие устройства управления называются компьютерными (ЧПУ типа *CNC*) и схемотехнически близки к устройствам управления роботами. По причинам, рассматриваемым ниже, устройства управления роботов, как правило, сложнее устройств управления станками с ЧПУ.

12.2. Количество осей и системы координат

В станках с ЧПУ применяется позиционное управление положением кромки режущего инструмента в пространстве. Для организации такого управления в принципе достаточно трех программно управляемых осей перемещения (степеней подвижности). В робототехнике обычно требуется не только совместить центр рабочего органа с некоторой точкой рабочего пространства, но и придать ему требуемую пространственную ориентацию. Для этого необходимо уже шесть степеней подвижности.

Центром инструмента (рабочего органа) в робототехнике называется точка, лежащая на оси последнего звена запястья робота на заданном пользователем расстоянии от него. В этой точке может находиться, например, конец сварочного электрода или центр захватываемого объекта. Центр инструмента в робототехнике играет ту же роль, что режущая кромка в механообработке.

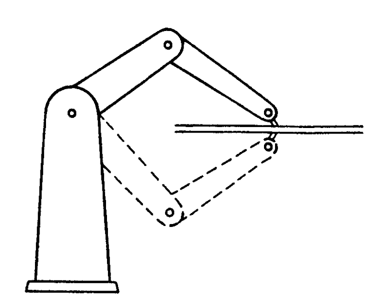


Рис. 12.2. Варианты ориентации рабочего органа робота при сварке стойки

Чтобы убедиться в важности ориентации рабочего органа, предположим, что необходимо сварить верхнюю и нижнюю стороны стойки, изображенной на рис. 12.2. Толщина стойки невелика, поэтому положения центра инструмента в координатах X, Y и Z при сварке обеих сторон будут мало отличаться. Тем не менее ориентации звеньев манипулятора, необходимые для сварки сверху и снизу, существенно отличаются. Подчеркнем, что это касается всех звеньев манипулятора, а не только звеньев запястья.

В некоторых роботах используется более шести степеней подвижности, так же как в некоторых станках с ЧПУ типа *CNC* имеется более трех осей перемещения. Классический пример использования дополнительной оси — вращение стола фрезерного станка с тремя осями перемещения. С другой стороны, существуют как роботы с количеством степеней подвижности менее шести, так и станки с ЧПУ с двумя осями перемещения. Для токарного автомата вполне достаточно числового управления перемещением инструмента по двум управляемым осям. Это объясняется симметричностью изготовляемых на токарном станке изделий. Поскольку сварочный электрод тоже симметричен относительно своей оси, большинство сварочных роботов имеют пять степеней подвижности [5].

12.2.1. Система координат

Три основные оси перемещения станка с ЧПУ обозначаются X, Y и Z. Например, для вертикального сверлильного станка

команда $+X$ означает перемещение стола вправо, команда $+Y$ перемещает стол в глубину, а команда $+Z$ вызывает подъем шпинделя от детали. Во всех станках с ЧПУ оси X, Y и Z выбираются так, чтобы получившаяся система прямоугольных координат была правосторонней.

В робототехнике используется несколько систем координат: мировая (МСК), связанная с инструментом (ИСК), система координат звеньев (СКЗ). В интеллектуальных роботах используется также система координат подсистемы очувствления (СКПО).

МСК представляет собой прямоугольную систему координат с началом, совмещенным с основанием робота. Оси X и Y горизонтальны, а ось Z перпендикулярна к ним обеим. МСК совпадает с системой координат, используемой в станках с ЧПУ типа *CNC*, хотя для роботов с системой координат, отличной от прямоугольной, определение осей X и Y выглядит не слишком естественно.

ИСК представляет собой систему координат, связанную с инструментом или рабочим органом. Этой системой очень удобно пользоваться при программировании роботов в режиме обучения. При использовании ИСК обучение выполняется так, как если бы управляющий движениями манипулятора программист находился непосредственно на рабочем органе. Все команды перемещения и разворота задаются относительно текущего положения рабочего органа и направления его оси, что очень удобно для программиста.

Термин СКЗ обозначает набор значений управляющих переменных звеньев, каждое из которых определяет положение звена манипулятора относительно предыдущего звена. Для роботов с системой координат, отличной от прямоугольной, СКЗ не является системой координат в полном смысле этого термина. В СКЗ обычно представлена информация в системах позиционного управления роботов. Наконец, СКПО представляет собой координатную систему, связанную с датчиком подсистемы очувствления, установленным над рабочим пространством робота. Она иногда используется в интеллектуальных роботах. Таким образом, в робототехнике используются четыре системы координат, тогда как в станках с ЧПУ типа *CNC* — только одна.

12.3. Архитектура системы

Как станки с ЧПУ типа *CNC*, так и робототехнические системы включают в себя механическое исполняющее устройство, перемещения которого определяются соответственно программой обработки детали и программой выполнения задания.

Как станки с ЧПУ типа *CNC*, так и робототехнические системы подразделяются на устройства с позиционным и контурным управлением [1—3]. В качестве примера систем позиционного управления можно привести робот для точечной сварки и сверлильный станок с ЧПУ. При выполнении точечной сварки манипулятор робота перемещается до тех пор, пока место сварки не окажется точно между электродами сварочной головки. Затем выполняется сварка, и манипулятор перемещается к следующей точке. Процесс повторяется до тех пор, пока сварка не будет выполнена во всех заданных точках. После этого манипулятор со сварочной головкой отводится в исходное положение, и система готова к обработке следующего изделия.

В наиболее общем виде система с позиционным управлением работает следующим образом: робот или станок перемещаются в положение, заданное значениями, выраженными в некоторой системе координат, после чего движение останавливается. Рабочий орган или инструмент выполняет операцию, в процессе которой положение манипулятора (станка) не меняется, после чего происходит переход к следующему заданному положению, и технологическая операция повторяется.

В системе с позиционным управлением скорость и траектория перемещения между заданными положениями не играют никакой роли. Поэтому в простейших устройствах позиционного управления для задания положения, в которое должен быть переведен инструмент, достаточно нескольких счетчиков. Значения отдельных координат целевого положения (выраженные в элементарных перемещениях по соответствующим степеням подвижности) заносятся в эти счетчики, разрядность которых определяется разрешающей способностью устройства управления. В каждом из звеньев манипулятора имеется шифратор, формирующий импульсы, количество которых определяется положением звена. Каждому из звеньев соответствует свой счетчик. Перед началом перемещения в счетчики заносятся значения приращений, необходимых для перевода манипулятора в следующее целевое положение. По мере движения шифраторы формируют импульсы, подающиеся на вычитающий вход счетчиков. В момент прихода манипулятора в целевое положение во всех счетчиках записаны нули.

В системах с контурным управлением и станках с ЧПУ типа *CNC* рабочий орган (инструмент) выполняет операцию в процессе перемещения (например, робот для дуговой сварки или фрезерный станок). При выполнении дуговой сварки манипулятор робота должен провести электрод в точности по заданной траектории. В системах с контурным управлением перемещение всех звеньев осуществляется одновременно, с различными скоростями. Значение скоростей определяется устройством управления таким образом, чтобы при движении отклонение от заданной траектории было минимальным.

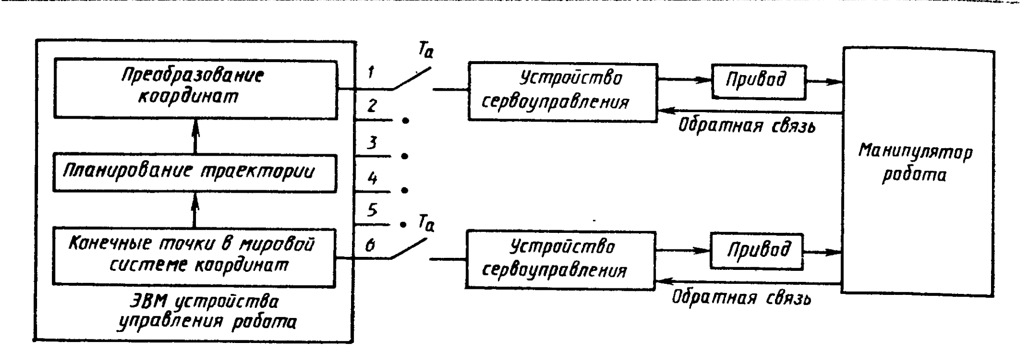


Рис. 12.3. Структурная схема робота с системой контурного управления

В системах с контурным управлением положение инструмента или рабочего органа в конце сегмента и скорости перемещения по координатным осям определяют траекторию движения (например, траекторию сварного шва). Скорость перемещения влияет на качество выполнения технологической операции. Например, при дуговой сварке колебания скорости перемещения приведут к неравномерности сварного шва (натекам или отверстиям).

На рис. 12.3 приведена структурная схема робота с системой контурного управления. Координаты целевых положений (опорных точек) в такой системе выражаются в МСК. По опорным точкам устройство управления робота определяет траекторию движения, преобразуя ее точки в значения управляющих переменных звеньев (т. е. в СКЗ). Значения управляющих переменных обновляются каждые T_a (как правило, $T_a = 30$ мс). Управляющие переменные задают цель управления замкнутым системам сервоуправления. Обычно в состав замкнутых систем сервоуправления звеньями робота входят специализированные микропроцессоры, тогда как в большинстве станков с ЧПУ типа *CNC* системы сервоуправления управляют работой приводных двигателей, осуществляющих перемещения по степеням подвижности.

Как правило, оси перемещения отдельных звеньев манипуляторов (особенно ангулярной структуры) не являются независимыми. Это означает, что нагрузка на одну из осей влияет на точность позиционирования по другим осям (в станках с ЧПУ подобной зависимостью можно пренебречь). Это приводит к усложнению систем сервоуправления роботов по сравнению с аналогичными системами станков.

Другое существенное отличие заключается в различии структур механических исполнительных органов станков и роботов. Конструкция манипулятора не может обеспечить высокой механической жесткости, поэтому добиться высокой точности движения манипулятора робота сложнее, чем инструмента станка с ЧПУ.

12.4. Интерполяторы

В промышленных системах с контурным управлением (фрезерных станках с ЧПУ типа *CNC*, роботах для дуговой сварки и других) для определения траектории между опорными точками используются интерполяторы. В программах обработки деталей и выполнения задания указаны только граничные точки сегментов контура, а положение рабочего органа в промежутках между ними рассчитывается управляющей ЭВМ, в реальном масштабе времени выдающей команды на перемещения по отдельным осям [5]. Как правило, в составе устройств ЧПУ типов *NC* и *CNC* имеются линейные и круговые интерполяторы, тогда как устройства управления большинства роботов позволяют делать только линейную интерполяцию между опорными точками.

Принцип действия линейного интерполятора станка с ЧПУ типа *CNC* довольно прост. Оси перемещения станка ортогональны и образуют прямоугольную систему координат. Движение по прямолинейной траектории определяется следующими соотношениями:

$$V_x = Vx/l; \qquad (12.1)$$

$$V_y = Vy/l \qquad (12.2)$$

и

$$V_z = Vz/l, \qquad (12.3)$$

где

$$l = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

Расстояния x, y и z измеряются вдоль координатных осей X, Y и Z соответственно, а V — требуемая скорость движения по траектории (в станках с ЧПУ — скорость подачи). Уравнения (12.1)—(12.3) составляют основу алгоритмов интерполяции станков с ЧПУ. Алгоритмы круговой интерполяции более сложны, их описание можно найти в [6, 7].

Интерполяторы станков с ЧПУ типа *CNC* можно использовать в устройствах управления роботов с прямоугольной системой координат и запястьем, оси подвижности которого пересекаются в одной точке. При этом интерполятор определяет траекторию перемещения точки пересечения осей запястья, формируя команды управления скоростью движения трех звеньев манипулятора согласно соотношениям (12.1)—(12.3). Для определения ориентации запястья применяется другой алгоритм [5].

Но в отличие от станков с ЧПУ в манипуляторах большинства роботов используются вращательные звенья, а это требует более сложных алгоритмов интерполяции траектории между опорными точками. В системах контурного управления роботов с вращательными звеньями интерполяция распадается на два этапа: планирование траектории и преобразование координат (см. рис. 12.3).

На первом этапе участок траектории, расположенный между опорными точками, аппроксимируется отрезком прямой и разбивается на небольшие секции (рис. 12.4). Затем траектории движений, соединяющих концы секций, определяются с помощью алгоритма решения обратной задачи кинематики (преобразования прямоугольных координат точек, соответствующих концам секций, в СКЗ). При движении по траектории, представленной на рис. 12.4, ЭВМ устройства управления роботом посылает в системы сервоуправления звеньями новые значения управляющих переменных в точках *1*, *2*, *3* и *4*, что приводит к последовательному прохождению манипулятора через эти точки. Траектория движения между концами секций не определена и в общем случае не совпадает с отрезком прямой. Линейные интерполяторы станков с ЧПУ, напротив, всегда обеспечивают перемещение по прямой, отклонение от которой не превышает разрешающей способности станка по перемещению [1, 2, 3].

Отклонение траектории манипулятора робота от прямолинейной зависит и от скорости его движения. Как правило, секционирование интервала интерполяции выполняется таким образом, чтобы отрезки, соответствующие секциям, манипулятор проходил за равные промежутки времени (порядка 25 мс). При этом, если манипулятор движется со скоростью 10 мм/с, длина секции составляет 0,25 мм, а если скорость увеличивается до 100 мм/с, длина секции возрастает до 2,5 мм. Поскольку траектория движения манипулятора внутри секции не определена, во втором случае погрешность интерполяции существенно выше.

На рис. 12.4 все секции имеют одинаковую длину. Однако в некоторых устройствах управления планирование траектории выполняется с учетом разгона и торможения. В этом случае равномерность разбиения интервала нарушается — в его начале и конце секции укорачиваются (рис. 12.5). Поскольку длина секции пропорциональна скорости, это приводит к ускорению или замедлению движения манипулятора.

В станках с ЧПУ ускорение и замедление движения достигается за счет изменения V в формулах интерполирования по заранее определенному закону. Отметим также, что скорости подачи (т. е. скорости перемещения инструмента) на один-два порядка меньше, чем скорости перемещения манипулятора. Например, при обработке алюминия средняя скорость подачи составляет 5 мм/с, а для стали она намного меньше. Вследствие этого в устройствах управления станков редко используется алгоритм планирования траектории, учитывающий разгон и торможение.

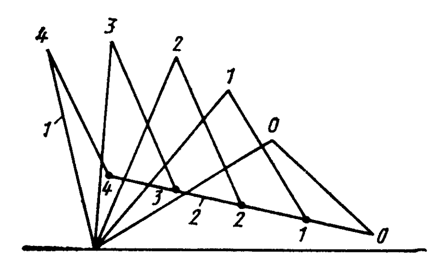


Рис. 12.4. Движение манипулятора робота по прямолинейной траектории:
1 — манипулятор; *2* — траектория

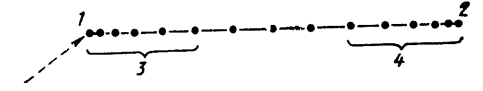


Рис. 12.5. Планирование траектории с учетом разгона и торможения:
1 — точка начала движения; *2* — точка конца движения; *3* — участок разгона; *4* — участок торможения

12.5. Замкнутые системы сервоуправления

В большинстве малых и средних станков с ЧПУ типа *CNC* и роботов в качестве приводов используются сервомоторы постоянного тока. Существуют два подхода к организации управления движением устройства с электромеханическим приводом. Первый из них получил наибольшее распространение в робототехнике — он предполагает управление моментом вращения на валу сервомотора за счет регулирования тока, протекающего через его обмотки. Другой подход, использующийся как в станках с ЧПУ, так и в роботах, предполагает управление скоростью вращения вала сервомотора за счет регулирования его напряжения питания. При первом подходе (регулирование тока) момент вращения, развиваемый на валу сервомотора, рассматривается как входной сигнал звена (рис. 12.6). При втором подходе (регулирование напряжения) манипулятор рассматривается как нагрузка, мешающая движению вала сервомотора (рис. 12.7). Это различие имеет принципиальное значение и во многом определяет устройство системы сервоуправления.

Наиболее очевидный способ организации управления движением манипулятора состоит в приложении к каждому из его звеньев усилия (момента), достаточного для манипулирования объектом и преодоления действия сил тяжести, трения и моментов инерции. При управлении величиной момента на валу сервомотора в привод вводится усилитель тока. Основная сложность при таком режиме управления заключается в необходимости точного определения момента инерции относительно осей каждого из звеньев манипулятора, без этих значений невозможно рассчитать траекторию и скорость движения [11]. Если оценка момента инерции окажется заниженной, то на валу сервомотора будет развит слишком большой момент. Это приведет к большему ускорению и соответственно большей скорости движения манипулятора. Это может привести к неприятным последствиям (например, к повреждению захваченной детали из-за того, что к моменту прихода в целевое положение скорость движения манипулятора не была полностью погашена). С другой стороны, если завысить оценку момента инерции, это приведет к большим затратам времени — манипулятор будет тормозиться задолго до прихода в целевое положение, очень медленно «доползая» до него.

Важным преимуществом способа управления с регулированием тока сервомотора является возможность длительного удержания заданного усилия или момента. При роботизации некоторых операций (например, вворачивания винтов, сборки деталей с малыми зазорами) это необходимо. Другое преимущество состоит в том, что при столкновении манипулятора с препятствием развиваемые приводами моменты не превышают заданных значений и энергопотребление не возрастает.

Альтернативный подход состоит в управлении скоростью движения манипулятора за счет регулирования напряжения питания сервомоторов. В этом случае в состав приводов вводятся усилители напряжения. Этот подход используется также в станках с ЧПУ типа *CNC* и в роботах с гидравлическими приводами [1, 5]. Его основное преимущество для робототехники состоит в том, что погрешность оценки момента инерции манипулятора влияет только на постоянную времени переходного процесса и не влечет за собой опасности большого перерегулирования или существенного снижения скорости перемещения. Манипулятор всегда приходит в целевое положение плавно, на малой скорости. Недостаток этого подхода состоит в том, что усилие, разви-

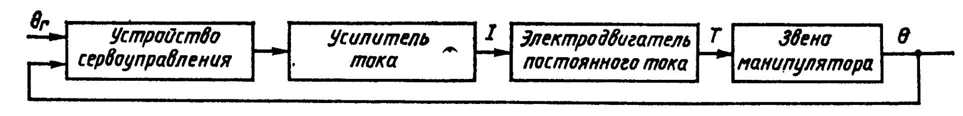


Рис. 12.6. Система сервоуправления с усилителем тока

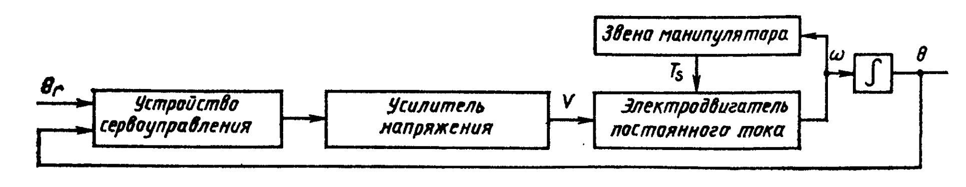


Рис. 12.7. Система сервоуправления с усилителем напряжения

ваемое приводным двигателем, не контролируется. При столкновении с препятствием ток сервомотора возрастает неограниченно до тех пор, пока сопротивление препятствия не будет преодолено. Это может привести к выходу из строя усилителя напряжения при столкновении с неподвижными объектами. Кроме того, этот режим управления не годится для выполнения операций, требующих развития строго определенных усилий (прессовая посадка, вворачивание винтов).

Выбор режима управления движением манипулятора определяется заданиями, для выполнения которых он используется, и окружающей робот технологической средой. Когда в процессе выполнения задания манипулятор свободно перемещается в пространстве (например, роботы для окраски распылением), удобнее управлять скоростью его перемещения. Когда рабочий орган робота должен соприкасаться с подвижными объектами, не сдвигая их с места, удобнее режим управления моментом. Отметим, что можно управлять либо скоростью движения манипулятора, либо развиваемым им усилием, но не обеими величинами одновременно.

12.6. Программирование

Для большинства станков с ЧПУ программы составляются аналитически, непосредственно в командах управления или с помощью системы автоматизации разработки программ (например, системы АПТ). При использовании аналитических методов программирования исключается простой станков — пока разрабатывается новая программа, станки обрабатывают детали по ранее составленным программам. По мере готовности программы обработки деталей переносятся на перфоленту (в современных системах используются гибкие магнитные диски). Перфолента направляется в цех, устанавливается в считывающее устройство стойки управления станком и считывается. После этого станок готов к изготовлению новой детали.

В роботизированных системах на этапе составления программ часто используются роботы, которые будут выполнять эти программы. В робототехнике применяются, по крайней мере, три методики разработки программ: запоминание опорных точек в режиме обучения, составление программы в режиме обучения проводкой и использование языка описания задания [5, 12, 13].

В роботизированных системах с позиционным управлением чаще всего используется первая методика — запоминание опорных точек в режиме обучения. На этапе составления программы оператор управляет действиями робота с пульта-приставки. Он вручную перемещает робот по отдельным степеням подвижности до тех пор, пока его манипулятор не придет в целевое положение. После этого координаты, соответствующие этому положению, запоминаются в памяти устройства управления робота. Операция повторяется во всех точках, входящих в технологический цикл робота.

Методика программирования проводкой используется в приложениях, требующих контурного управления. Оператор захватывает рабочий орган робота и проводит его по нужной траектории. При этом ведется запись параметров положений, через которые проходит манипулятор. Приводы манипулятора на время составления программы отключаются. Такой метод разработки программ также требует использования робота.

Третья методика программирования предполагает использование специальных языков программирования роботов. Эта методика аналогична разработке программ обработки деталей для станков с ЧПУ с помощью языка АПТ. Основной недостаток методики аналитического программирования заключается в том, что, пользуясь ею, трудно учесть погрешности позиционирования, вызванные деформациями звеньев манипулятора. Эти отклонения зависят от величины нагрузки и положения манипулятора. При составлении программ для станков с ЧПУ эта проблема не возникает, поскольку механическая жесткость исполнительного устройства станка велика и в процессе резания оно практически не деформируется.

Поэтому во многих роботизированных системах (например, системах программирования роботов ПУМА фирмы «Юнимейшн», в которых используется язык программирования ВАЛ), программирование выполняется в два этапа. На первом этапе в программе выполнения задания используются символьные идентификаторы опорных точек (например, *PNT1*). На втором этапе манипулятор робота поочередно приводится в каждую опорную точку и идентификаторам ставятся в соответствие реальные параметры их положения. Таким образом, в некоторых случаях робот приходится задействовать на этапе составления программ даже при использовании языков программирования. В системах программирования для станков с ЧПУ использование станка на этапе составления программы исключено.

В будущем весь объем программирования для роботизированных систем будет выполняться без отвлечения роботов от выполнения производственных заданий. Для этого лингвистическая система программирования должна быть дополнена постпроцессором, аналогичным постпроцессорам, используемым в системах программирования станков с ЧПУ. Последние обрабатывают выходные данные лингвистической системы программирования (например, транслятора языка АПТ), формируя управляющую программу для конкретного станка. Сформированная постпроцессором программа выводится на перфоленту или записывается на магнитные носители. Для каждого типа станка с ЧПУ требуется собственный постпроцессор, учитывающий специфические особенности: скорость разгона, величину стола, максимальную скорость подачи, использование охлаждающей эмульсии и др.

Аналогично для роботов различных конструкций должны быть разработаны различные постпроцессоры. Но они значительно сложнее постпроцессоров станков с ЧПУ, поскольку они должны выполнять кинематическое и динамическое моделирование манипулятора. Лингвистическая система программирования должна передавать в постпроцессор символьные имена опорных точек и расчетные оценки нагрузки при выполнении всех перемещений, по которым постпроцессор должен формировать готовую программу выполнения задания. Только так можно исключить использование робота на этапе разработки программ.

12.7. Адаптивные системы

Большинство используемых в настоящее время роботов и станков с ЧПУ могут неограниченно долго повторять последовательность операций, зафиксированную в управляющей программе. Однако эти системы не могут реагировать на изменение окружающей их технологической среды. Предположим, например, что токарный станок с ЧПУ типа *CNC* запрограммирован на изготовление цилиндрических деталей радиусом 200 мм из заготовок, радиусы которых могут лежать в диапазоне от 201 до 204 мм. В программе указана скорость подачи, соответствующая снятию с заготовки слоя материала толщиной 4 мм (в противном случае возможна поломка резца). Однако при снятии слоя меньшей толщины такая скорость подачи оказывается заниженной. В робототехнике возможны явления того же порядка: если робот запрограммирован на захватывание детали в некоторой точке рабочего пространства, то пальцы его захвата будут сдвигаться в этой точке вне зависимости от того, есть ли в ней деталь. Для того, чтобы избежать подобных ситуаций, промышленные системы снабжаются средствами адаптации к изменениям окружающей среды — датчиками и подсистемами очувствления.

Адаптивные системы, к которым относятся станки с адаптивным управлением и интеллектуальные роботы, состоят из обычного станка с ЧПУ или робота и двух дополнительных компонентов: 1) одного или более датчиков, фиксирующих изменения технологической среды; 2) программного обеспечения, обрабатывающего полученную от датчика информацию и вырабатывающего корректирующие воздействия, передающиеся в устройство управления станка или робота. В робототехнике при разработке такого программного обеспечения применяются алгоритмы искусственного интеллекта, программы для станков с ЧПУ существенно проще.

На рис. 12.8 представлена структурная схема адаптивного устройства управления токарного станка с ЧПУ. Система управления замкнута, с помощью обратной связи по усилию, приложенному к резцу, скорость подачи регулируется в зависимости от конкретных условий обработки. Устройство управления станком типа *CNC* выступает как часть прямой ветви цикла управления адаптивного устройства, выполняющая исходную программу, которая считывается с перфоленты. Связь устройства *CNC* и устройства адаптивного управления осуществляется командами корректировки

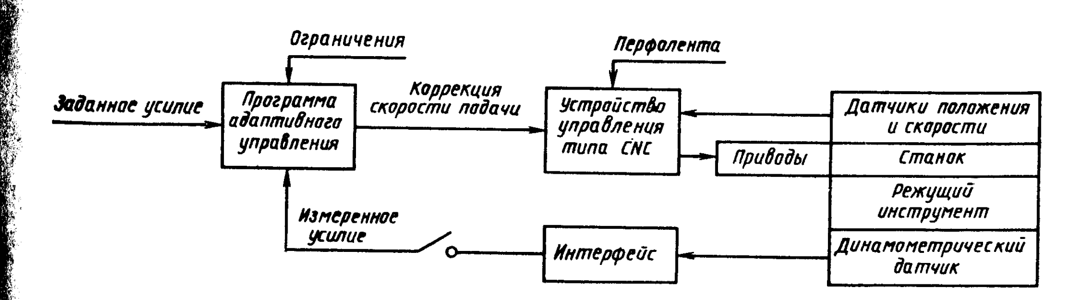


Рис. 12.8. Структурная схема адаптивного устройства управления токарного станка с ЧПУ

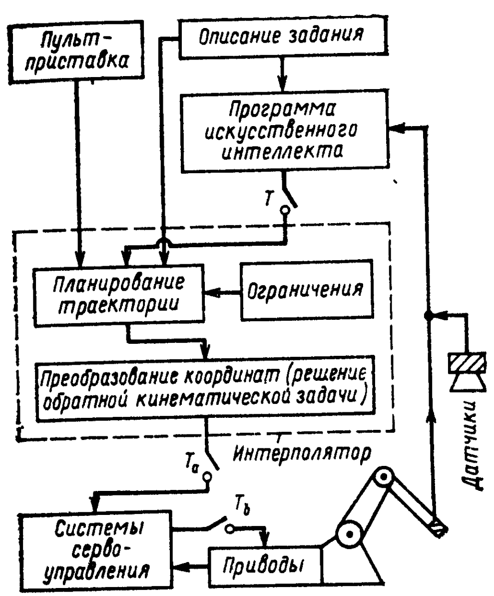


Рис. 12.9. Структурная схема интеллектуального робота

скорости подачи, формируемыми программным обеспечением адаптивного управления.

Система адаптивного управления работает в дискретном режиме. Усилие, приложенное к резцу, измеряется каждые T с (как правило, $T = 0{,}1$ с), результат измерения преобразуется в цифровое представление и посылается в управляющую ЭВМ устройства адаптивного управления. ЭВМ сравнивает его с заданным значением усилия, определяет их разность и согласно алгоритму коррекции определяет соответствующие поправки. Обсуждение стратегий и алгоритмов коррекции выходит за пределы настоящей главы (см. [14]).

В станках с ЧПУ используются только датчики контактного типа, измеряющие силы, моменты и мощность. В робототехнике используются как контактные, так и неконтактные датчики. К последним относятся датчики присутствия объекта, лазерные, зрительные, акустические и дальномерные датчики [15]. В интеллектуальных (иначе — адаптивных) роботах используются датчики (один или более), информация с которых обрабатывается программами искусственного интеллекта. Решения, выработанные этими программами в реальном масштабе времени, могут изменить заданную программой выполнения задания последовательность операций. Структурная схема интеллектуального робота представлена на рис. 12.9. Согласно этой схеме он представляет собой замкнутую систему управления с двумя уровнями иерархии. К нижнему уровню управления относятся системы позиционного управления звеньев, в каждой из них имеется датчик обратной связи по положению. В некоторых роботах на нижнем уровне управления имеются циклы управления скоростью, в которых в качестве датчиков используются тахометры.

К верхнему уровню иерархии относится датчик, фиксирующий изменения окружающей робот технологической среды, с устройством связи и программа искусственного интеллекта. Цикл управления замыкается через программу интерполяции, на вход которой поступают как команды исходной программы, так и поправки, сгенерированные программой искусственного интеллекта.

В большинстве интеллектуальных роботов используются три различных значения длительности цикла управления: T, T_a и T_b. Программа искусственного интеллекта опрашивает подсистему очувствления каждые T с (как правило, $T = 0{,}05 \div 0{,}2$ с). Полученная информация используется для определения траектории дальнейшего движения. Определяющие траекторию параметры (положение рабочего органа и его скорость) передаются программе интерполятора, планирующей траекторию движения. Программа преобразования координат, решающая обратную кинематическую задачу, определяет значения управляющих переменных звеньев и передает их системам сервоуправления каждые T_a (как правило, $T_a = 0{,}03$ с). Микропроцессор системы сервоуправления сравнивает параметр текущего положения звена с полученным значением управляющей переменной. Опрос датчика положения звена и выдача команд приводу выполняется каждые T_b (как правило, $T_b = 1$ мкс). Для всех роботов соблюдается соотношение $T_b \leqslant T_a < T$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koren, Y., *Computer Control of Manufacturing Systems*, McGraw-Hill, New York, 1983.
2. Olesten, N. O., *Numerical Control*, Wiley-Interscience, New York, 1970.
3. Groover, M. P., *Automation, Production Systems, and Computer-Aided Manufacturing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1980.
4. Engelberger, J., *Robotics in Practice*, AmaCom, A Division of American Management Association, 1980.

5. Koren, Y., *Robotics for Engineers*, McGraw-Hill, New York, 1985.
6. Jordan, B. W., Lenon, W. J., and Holm, B. D., An Improved Algorithm for Generation of Nonparametric Curves, *IEEE Transactions, on Computers*, Vol. C-22, No. 12, December 1973, pp. 1052—1060.
7. Masory, O. and Koren, Y., Reference-Word Circular Interpolators for CNC Systems, *Transactions ASME, Journal of Engineering in Industry*, Vol. 104, November 1982.
8. Beckett, J. T. and Mergler, H. W., Analysis of and Incremental Digital Positioning Servosystem with Digital Rate Feedback, *Transactions ASME, Journal of Dynamic Systems Measuring Control*, Vol. 87, March 1965.
9. Ertell, G., *Numerical Control*, Wiley-Interscience, New York, 1969.
10. Poo, A. N. and Bollinger, J. G., Dynamic Errors in Type I Contouring Systems, *IEEE Transactions Industrial Applications*, Vol. IA-8, No. 4, July 1972, pp. 477—484.
11. Paul, R., *Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1981.
12. Ardayfio, D. D. and Pottinger, H. J., Computer Control of Robotic Manipulators, *Mechanical Engineering*, Vol. 104, No. 8, August 1982, pp. 40—45.
13. Grossman, D. D., Robotic Software, *Mechanical Engineering*, Vol. 104, No. 8, August 1982, pp. 46—47.
14. Ulsoy, G., Koren, Y., and Rasmussen, F., Principal Developments in Adaptive Control of Machine Tools, *Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems Measuring Control*, Vol. 105, No. 2, June 1983, pp. 107—112.
15. Nitzan, D., Assessment of Robotic Sensors, *Proceedings of the 1st International Conference on Robot Vision and Sensory Control*, Stratford on Avon, England, April 1981, pp. 1—8.

Глава 13
ДАТЧИКИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РОБОТОВ

А. С. Кэк, университет Пэрдью, Вест Лафайетт, шт. Индиана
Дж. С. Албус, Национальное бюро стандартов, г. Вашингтон

13.1. Введение

Значительная часть современных промышленных роботов оснащена либо простейшими чувствительными датчиками, либо не имеет их вовсе. Для управления такими роботами используются сигналы обратной связи, несущие информацию о положениях его собственных сочленений, а также сигналы блокировок и синхронизации. Указанные роботы могут функционировать только в такой среде, информация о местоположении всех объектов в которой известна с достаточной точностью, чтобы ими можно было манипулировать. Для множества применений в промышленности такой способ функционирования оказывается вполне удовлетворительным. В качестве примера можно привести использование робота для удаления деталей из пресс-форм или из машин для литья под давлением. В данных примерах изготовленные детали находятся всегда в одном и том же месте, так что нет необходимости иметь чувствительные датчики для отыскания детали или компенсации рассогласования по расстоянию. Другим весьма распространенным примером может служить применение роботов для точечной сварки автомобильных кузовов. В этом случае кузова автомобилей, следующие на конвейере друг за другом, останавливаются всегда точно в одном и том же месте. Следовательно, робот не нуждается в чувствительных элементах для поиска сварочных точек. Даже когда сварка производится на движущемся конвейере, информация о перемещениях кузова для робота снимается с оптических датчиков, встроенных в конвейер. Кроме того, такие же датчики регистрируют моменты вхождения обрабатываемых кузовов в рабочую зону робота-сварщика и инициируют программу его функционирования. Затем вычислительное устройство самого робота по программе вырабатывает сигналы для соответствующих манипуляций на движущемся конвейере.

Чувствительные органы необходимы роботам, обладающим интеллектом, под которым понимается способность действовать

в изменяющейся среде. Наличие интеллекта позволяет адаптивно управлять движениями программируемого манипулятора, команды которому выдаются в зависимости от данных, поступающих с чувствительных датчиков. В данном справочнике рассматриваются отдельные наиболее распространенные типы датчиков. В гл. 14 обсуждаются системы технического зрения роботов (СТЗ) и некоторые современные алгоритмы обработки зрительной информации, применяемые в промышленности для контроля деталей. В гл. 16 рассмотрены некоторые стереоскопические зрительные системы, такие, как телевизионные, системы структурированного освещения, лазерные и ультразвуковые системы, используемые в роботах для составления дальнометрических карт поля обзора.

Целью данной главы являются обзор и краткое рассмотрение преимущественно тех аспектов функционирования робототехнических датчиков, которые не затрагиваются более подробно в других главах настоящего справочника. В этой и последующих главах уделено внимание только тем типам датчиков, которые обеспечивают обзор в непосредственной близости от робота, а также в ближайшей и удаленной окрестности. Датчики, обеспечивающие функционирование внутренних подсистем самого робота, здесь не рассматриваются, поскольку они аналогичны датчикам традиционных систем автоматического управления и подробно освещены в литературе, например в [4, 8, 14, 19].

Для функционирования интеллектных роботов, в отличие от обычных, требуется гораздо больше информации, чем просто массив отсчетов сигналов датчиков, так как по этим данным необходимо построить конкретные модели поведения (или последовательности элементов движения) роботов, соответствующие выполняемой задаче. Построение моделей поведения робота представляет собой гораздо более сложную задачу, чем просто конструирование приборов или даже систем обработки данных. Учитывая значительный прогресс, наблюдающийся в последнее время в области разработки различных типов датчиков, можно отметить, что именно моделирование поведения по результатам обработки сенсорной информации определяет достигнутый уровень развития интеллекта роботов.

Для того, чтобы проиллюстрировать сложность проблемы составления (представления знаний), рассмотрим простейшую сцену (рис. 13.1), предназначенную для восприятия СТЗ робота. Человеку сразу видно, что эта сцена содержит цилиндр и расположенный за ним куб. Если же она воспринимается СТЗ робота, содержащей

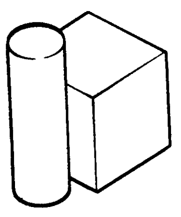


Рис. 13.1. Пример простейшей модели сцены

только одну телевизионную камеру, при составлении модели могут возникнуть затруднения, поскольку в этом случае утрачивается важная информация о пространственных отношениях. Рассмотрим случай, когда робот обладает более совершенной СТЗ, способной воспринимать информацию о глубине сцен, так что имеется возможность сформировать в памяти ЭВМ дальнометрическую карту всего поля обзора. Тогда для того, чтобы получить формализованное представление сцены, необходимо сначала брать отсчеты яркости близлежащих точек и формировать локальную плоскость изображения, нормальную к направлению взятия отсчетов. Сумма отсчетов, полученных в диапазоне изменения углов обзора датчика, образует локальный растр. Совокупность локальных растров объединяется в машине в общую плоскость, размер которой определяется на основе ограничений, зависящих от существа решаемой задачи. В дальнейшем полученная на низшем уровне обработки совокупность отсчетов преобразуется в некоторое формализованное символическое описание каждой плоскости изображения, которое сравнивается с хранящимися в памяти ЭВМ знаниями робота. Иногда в качестве такого символического описания достаточно взять набор статистических характеристик, вычисленных для плоскостей изображения, который затем классифицировать на более высоком уровне обработки путем отображения на имеющуюся базу знаний. Приведенный пример показывает, что требование обработки значительного объема получаемой сенсорной информации является наиболее существенным из экономических и иных факторов, определяющих уровень интеллектуальных возможностей робота.

Формирование моделей преобразования информации (текущих знаний) рассматриваемых здесь роботов реализуется на низшем уровне, согласованном с имеющейся базой знаний, содержащей ограниченное число легко выделяемых признаков объектов или параметров среды. Например, при обработке телевизионного изображения такой низший уровень формирования модели

может состоять из представления изолированного объекта его двоично кодированным силуэтом и выявления характерных числовых параметров. Этот уровень формализации сенсорных данных вполне приемлем для выполнения таких функций, как захват и перемещение, простейший контроль, определение положения и ориентации изолированного объекта, простейшие операции сборки типа установки ламп в патроны. В настоящее время уже существуют промышленные робототехнические системы, в которых используется рассмотренный уровень формализации входных сенсорных данных для формирования сигналов обратной связи системы управления манипулятором. В большинстве таких систем сигналы обратной связи формируются на основе данных, получаемых от одного или двух датчиков, а для воздействия других датчиков рабочая область жестко ограничена. В качестве примеров можно привести функционирование руки сборочного робота фирмы «Хитати» [12], реализуемое на основе сигналов обратной связи тактильных датчиков; работу другого робота фирмы «Хитати» [2], осуществляющего дуговую сварку с помощью сигналов обратной связи от вихретоковых датчиков, а также действие робота-сборщика фирмы «Оливетти» [6, 7], управляемого сигналами от преобразователя усилий. Более сложные сборочные и контрольные операции потребуют обработки информации от множества датчиков на более высоких иерархических уровнях представлений, для того чтобы корректно отображать пространственные отношения, связывающие различные элементы трехмерной сцены.

Датчики промышленных роботов обычно подразделяют на контактные и бесконтактные. Контактные датчики в свою очередь делятся на тактильные, датчики касания и силомоментные. Бесконтактные датчики классифицируют на чувствительные индикаторы близости и обзорно-поисковые преобразователи. При формировании управляющих сигналов обратной связи контактные и бесконтактные датчики взаимно дополняют друг друга. Например, при решении задачи установки стержня в отверстие на первом этапе поиска отверстия и установки стержня вблизи его (или даже частичной посадки) может применяться зрительный датчик с низкой разрешающей способностью. На втором этапе для формирования обратной связи с целью точной подгонки стержня в отверстие можно использовать силомоментные датчики. Оптимальный алгоритм завершения этой операции должен обеспечивать минимизацию сил заклинивания и крутящего момента.

В качестве другого примера успешного взаимодействия контактных и бесконтактных датчиков рассмотрим задачу снятия изделия с рабочего стола. Как и в предыдущем примере, для поиска и определения параметров положения объекта используется телевизионный датчик, обладающий широким углом зрения и невысокой разрешающей способностью. Он может также употребляться для определения оптимального соотношения точек захвата объекта при произвольной его ориентации. После этого пальцы руки робота захватывают определенные телевизионным датчиком места изделия с усилием, регулируемым сигналами обратной связи, которое достаточно для удержания и предотвращения проскальзывания.

Бесконтактные датчики СТЗ могут использоваться не только при решении задач, не требующих высокой разрешающей способности. Повысить разрешение можно за счет сужения поля обзора или применения специальных телевизионных преобразователей, хотя и более дорогих, но обладающих высокой четкостью, таких, как электронно-лучевой диссектор или линейка твердотельных преобразователей с разрешением, например, 2048 элементов.

Для успешного решения производственных задач, выполняемых часто в неструктурированной, недружественной, а иногда и агрессивной среде, «разумному» роботу требуется множество взаимодействующих управляющих подсистем очувствления. Необходимо, однако, заметить, что с точки зрения автоматизации производства множество задач (в частности, по сборке деталей) может быть выполнено без очувствления исполнительных механизмов робота. Например, в лаборатории фирмы «Кавасаки» (Япония) был продемонстрирован робот, выполнявший довольно сложные операции по совместной сборке моторов и коробок передач, который управлялся высокоточной системой с обратной связью только по положению. Этот робот имеет разумно сконструированные захваты и специальные приспособления для удержания деталей, для которых при сборке допускался незначительный относительный изгиб. Там же было продемонстрировано, что использование кондуктора в сочетании с осциллирующими движениями и тщательно подобранные конусности и фаски позволяют успешно собирать детали при небольших несоосностях, а также предотвращать заклинивание сопрягаемых деталей при жестких допусках.

Сборку деталей при малых зазорах без сенсорной обратной связи способно осуществлять оригинальное приспособление, названное устройством пассивной податли-

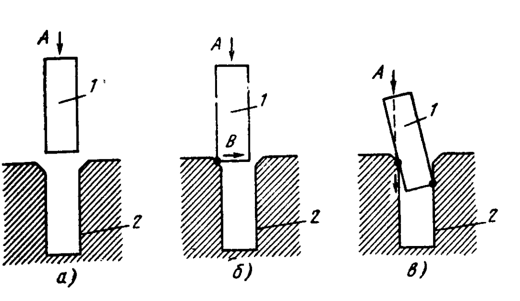


Рис. 13.2. Этапы введения стержня в гнездо:
1 — стержень; *2* — гнездо

вости с удаленным центром (УПУЦ) [9]. Как будет показано далее, устройство проецирует соответствующим образом центр податливости детали, которую предстоит, например, ввести в отверстие, и тем самым обеспечивает необходимый зазор, предотвращающий заклинивание, заедание или иные деформации. Центр податливости — это точка приложения сил, действующих на объект при сборке. Он является также точкой приложения равнодействующей двух составляющих: силы боковой податливости и силы вращательной податливости. Усилия, возникающие при сборке, минимизируются, когда центр податливости размещается вблизи точки начального соприкосновения деталей.

Особенности функционирования УПУЦ можно проиллюстрировать на приведенном примере, взятом из производственной документации фирмы «Лорд индастриал продактс» — изготовителя указанных устройств. Рассмотрим сначала обычный процесс введения стержня в гнездо (рис. 13.2, *а*). Стрелка *A* указывает начальное направление действия силы, приложенной к стержню. Если имеется боковая несоосность стержня и гнезда, в мо-

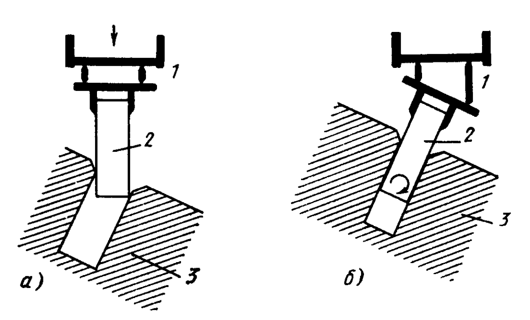


Рис. 13.3. Соединение деталей с помощью УПУЦ:
1 — УПУЦ; *2* — стержень; *3* — гнездо

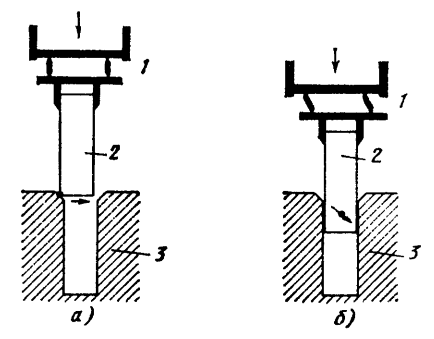


Рис. 13.4. Соединение несоосных деталей с помощью УПУЦ:
1 — УПУЦ; *2* — стержень; *3* — гнездо

мент касания стержнем фаски возникает горизонтально направленная сила *B*, действующая на переднюю оконечность стержня (рис. 13.2, *б*). В результате такого взаимодействия, скорее всего, возникает заклинивание (рис. 13.2, *в*), и любая попытка дальнейшего давления только усугубит положение. Принципиальный источник затруднений заключается в том, что стержень толкают в гнездо.

В противоположность рассматриваемому случаю в УПУЦ стержень заставляют втягиваться в гнездо. Вновь рассмотрим ситуацию, когда стержень и гнездо несоосны. Как показано на рис. 13.3, *а*, когда передняя оконечность стержня, удерживаемого захватом УПУЦ, соприкасается с фаской гнезда, возникающая горизонтально направленная сила вынуждает стержень поступательно перемещаться, тем самым облегчая совмещение (рис. 13.3, *б*). Аналогичный результат получается и в случае, когда оси стержня и гнезда не параллельны друг другу (см. рис. 13.4, *а*). Принимая требуемые положения с помощью описанного выше механизма поступательного перемещения, стержень легко входит в гнездо. Из-за наличия упругих свойств у захвата УПУЦ результирующие вращающие моменты будут поворачивать стержень вокруг центра податливости и облегчать окончательное введение (см. рис. 13.4, *б*).

Завершая вводную часть, авторы считают необходимым обратить внимание читателя на ранее опубликованные работы по робототехническим датчикам [3, 21, 25, 29].

13.2. Системы технического зрения

В гл. 14 будут подробно рассмотрены системы технического зрения и приведены алгоритмы обработки визуальной информации. В данной главе даются общие комментарии и обсуждаются относительные достоинства и недостатки жестко фиксированной обзорной СТЗ, расположенной над рабочей зоной робота, по сравнению с визуальными датчиками, размещенными на его манипуляторе.

СТЗ роботов предназначены преимущественно для решения двух основных задач: автоматизированного контроля изделий и управления манипуляторами. При решении задач управления СТЗ должны обладать способностью поиска, обнаружения и определения параметров положения объектов, а также их ориентации. Очевидно, что эти способности позволят обеспечить манипулирование объектами, расположенными в заранее не определенных местах и имеющими произвольную ориентацию. Указанное свойство является одним из доводов в обосновании экономической целесообразности применения систем технического зрения в робототехнике. Современные роботы способны выполнять указанные функции при условии, что манипулируемые объекты могут занимать ограниченное число фиксированных положений на рабочем столе или транспортере. Кроме того, для успешного функционирования необходимо, чтобы каждый объект при любом занимаемом им положении можно было отличить от всех других объектов, участвующих в решении данной задачи.

В работе [26] рассмотрен перечень задач управления, для решения которых необходимы системы технического зрения. Основными из этих задач являются следующие:

манипуляция обособленными объектами, расположенными на транспортерах, с целью их сортировки, упаковки в контейнеры, подачи на станки ориентированными в точно определенном положении и т. д.;

извлечение деталей из контейнеров, применяемых в процессе производства для промежуточного накопления, хранения и транспортировки деталей;

манипуляция деталями в производственных процессах доводки, герметизации, снятия заусенцев, резания и многих других;

осуществление сборочных операций.

В число сборочных операций входят монтаж, включающий доставку деталей и их сопряжение, и крепление, которое может заключаться в точечной сварке, клепке, свинчивании, соединении болтами, гвоздями или скобами, склеивании и т. п. Робот-сборщик, снабженный СТЗ, обладает свойством так называемой активной аккомодации, которая предполагает способность компенсировать погрешности в позиционировании и ориентации объектов. При использовании большинства из существующих визуальных датчиков компенсация рассогласования получается достаточно грубой. Более точное управление позиционированием детали или инструмента относительно обрабатываемой детали достигается средствами так называемой пассивной аккомодации, при которой силы реакции и крутящие моменты, возникающие в датчиках, размещенных на цапфе робота, используются для коррекции остаточных рассогласований.

В работе [28] приводится перечень применений СТЗ роботов для решения задач контроля. Наиболее распространенными из них являются следующие применения:

требующие качественной или грубой количественной оценки. Такие задачи контроля могут включать определение свойств поверхностей (например, наличия заусенцев, трещин, полостей, ямок и других дефектов), проверку целостности и комплектности узлов, считывание бирок, сортировку и множество других задач;

требующие высокоточных количественных оценок для определения, например, критических посадочных размеров изделия или измерения износа инструмента.

На практике не существует универсальных СТЗ, которые могли бы удовлетворить требованиям сразу всех (или даже большинства) перечисленных применений. В гл. 14 рассмотрены некоторые основные разновидности таких систем, которые являются лишь первыми шагами на пути решения перечисленных задач. Описанные в ней алгоритмы позволяют опознавать и определять местоположение объектов и их ориентацию для случаев, когда предъявляемые объекты могут занимать только фиксированные положения. Представлены также алгоритмы качественного и грубого количественного анализа сцен, основанные на описаниях объектов лишь некоторыми простыми признаками, такими, как площадь и длина контура двоично-квантованного силуэта всего объекта или же некоторой его части, например отверстия в объекте.

Большинство современных СТЗ используют неподвижную камеру, расположенную над рабочей зоной робота. Такая схема обладает тем преимуществом, что во время приема и обработки визуальных данных робот может участвовать в выполнении других операций производственного процесса. Ее недостатком является потеря эффективности функционирования СТЗ в тех случаях, когда манипулятор робота частично закрывает объект, что может произойти в процессе его поиска. В работе [20] показано, что в случае установки датчика на захвате робота (система «глаз в руке») проблема его частичного ослепления отсутствует и, кроме того, возникает воз-

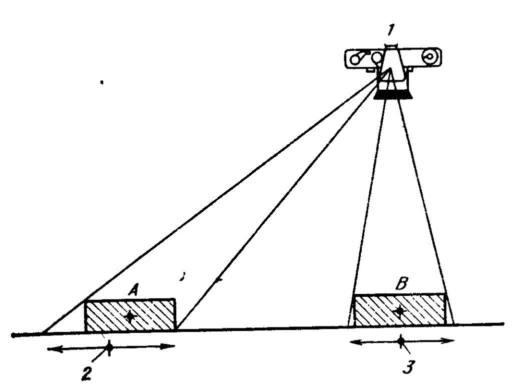


Рис. 13.5. Параллактическая ошибка в СТЗ с неподвижной камерой:
1 — камера; *2* — положение вычисленного центра площади объекта *A*; *3* — то же, для объекта *B*

можность использовать датчики со значительно более низкой разрешающей способностью, не теряя при этом в точности вычисления местоположения или ориентации объекта.

Алгоритмы распознавания объектов требуют применения зрительных датчиков с гораздо более высокой разрешающей способностью, чем алгоритмы определения только положения и ориентации. Однако более чем в 70 % случаев применения СТЗ для автоматизации производства вообще нет нужды в распознавании объектов, поскольку при движении по линии обработки они, как правило, предварительно рассортировываются. В большинстве таких случаев важно лишь точно определить местоположение и ориентацию объекта в течение рабочего цикла робота.

В работе [20] показано, что в системах с неподвижно закрепленными камерами возникают ошибки параллакса (пример, иллюстрирующий появление такой ошибки, приведен на рис. 13.5). Вследствие этого системы с датчиками, размещенными на манипуляторе робота, гораздо точнее определяют положение и ориентацию объекта. На рис. 13.5 показано, что наличие параллактической ошибки приводит к погрешностям в определении центра площади объекта, когда он находится в периферийной зоне поля обзора камеры. Подобные ошибки отсутствуют в системах с перемещаемой камерой, поскольку в них рассматриваемый объект всегда находится в центральной зоне.

Эффективная разрешающая способность перемещаемых визуальных датчиков на малых расстояниях сравнима с разрешающей способностью неподвижной телевизионной камеры. Кроме того, малые размеры анализируемого изображения приводят к значительному сокращению времени обработки. Например, для приема информации одного кадра изображения, состоящего из матрицы с разрешением 32 × 32 отсчета, в перемещаемом датчике потребовалось около 20 мс. Время обработки полученного массива оказалось менее 8 мс и в сумме составило менее 28 мс, что соответствует длительности рабочего цикла робота ПУМА. Из-за низкой разрешающей способности перемещаемые датчики обладают еще одним существенным достоинством, заключающимся в гораздо большей глубине резкости по полю, что исключает необходимость автоматической фокусировки и, следовательно, уменьшает стоимость, размеры и вес конструкции.

13.3. Стереоскопическое зрение в робототехнике

Принципы функционирования и алгоритмы работы основных типов датчиков, применяемых для восприятия роботом глубины пространства, обсуждаются в гл. 16. В данном разделе в качестве иллюстрации приведен простой, но изящный пример такого устройства, разработанного Национальным бюро стандартов. Принцип действия устройства основан на использовании структурированного освещения, более подробно рассмотренного также в гл. 16. Это устройство может применяться и для определения ориентации деталей на рабочем столе.

В данном устройстве (рис. 13.6) свет из щелевого излучателя, смонтированного на цапфе робота, проектируется на область, расположенную перед пальцами захвата. На объекте лучи образуют светлую линию, которая наблюдается с помощью телевизионной камеры, также смонтированной на цапфе. Известные геометрические соотношения между излучателем, камерой и светлой линией позволяют зрительной системе определить положение объекта относительно пальцев руки робота. С помощью калибрационной сетки (рис. 13.7) ЭВМ пересчитывает координаты точки на освещенной линии из системы строка—номер отсчета, связанной с линией, в систему координат (x, y), связанную с пальцами руки робота. Конфигурация линии отображает профиль объекта в глубину. Наклон любого отрезка этой линии отображает ориентацию соответствующей части передней плоскости объекта относительно пальцев робота. Полученные данные используются системой управления для перемещения руки робота в направлении к объекту и для его захвата. Действуя рассмотренным образом, робот

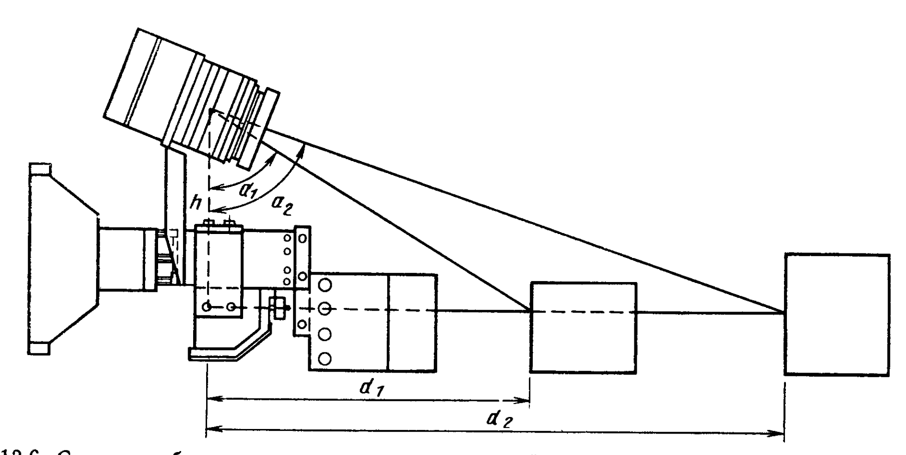


Рис. 13.6. Схема прибора для определения расстояний:
d_1 — расстояние до объекта при угле наблюдения яркой метки α_1; d_2 — расстояние до объекта при угле наблюдения α_2; h — известная высота камеры [1]

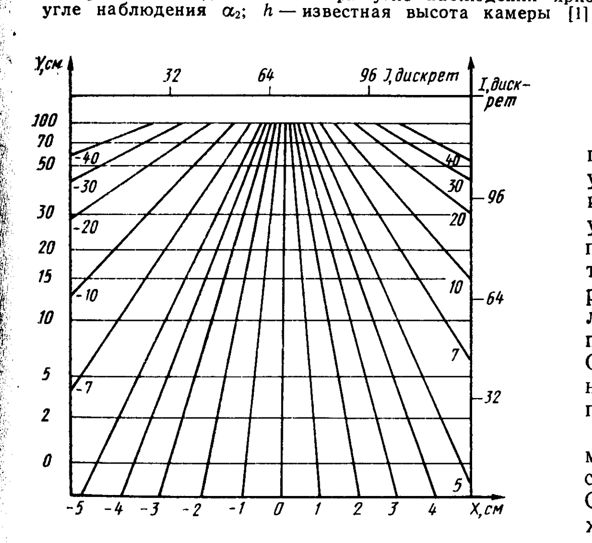


Рис. 13.7. Пример калибрационной сетки:
J — отсчет по вертикали; *I* — отсчет по горизонтали [1]

может упорядочить произвольно сложенную кучу брусков или цилиндров. Он может также измерить форму отливки, найти край опоки, обнаружить трещину между кирпичами или измерить угол между двумя металлическими деталями. Приведенные примеры отражают наиболее типичные виды визуальной информации, которые встречаются при выполнении множества производственных задач, возникающих на заводах или строительных площадках. Более подробные сведения о данном устройстве приведены в [2].

13.4. Системы тактильного очувствления

Тактильные свойства человеческой руки позволяют легко определить прикосновение, усилия, форму, относительное перемещение и факт движения предметов. Как только усилие, приложенное к коже, превышает предел пропорциональной чувствительности тактильного ощущения, датчики удлинения, расположенные в сухожилиях и мускулах ладони, запястья и руки, фиксируют это и передают соответствующие сигналы мозгу. Современные исследования систем тактильного очувствления роботов направлены на получение аналогичных свойств.

Датчики зрительной и тактильной информации, как было отмечено во введении, часто дополняют друг друга. С помощью СТЗ с широким полем обзора робот может осуществлять поиск объектов и определять их положение, а тактильные датчики могут употребляться для определения формы объектов, их ориентации, а также для определения реакции на усилия, развиваемые во время захвата. Обладая свойством чувствовать прикосновение, механическая рука роботов будущего будет способна оперировать с гибкими, хрупкими и мягкими предметами.

В работе [13] приведен обширный обзор современного состояния и достижений исследователей и изготовителей робототехнических устройств в области тактильных датчиков. Из всего спектра возможных применений систем тактильного очувствления в этом обзоре рассмотрены: слежение за траекторией дуговой сварки, извлечение деталей из контейнеров, ориентирование деталей, адаптивное захватывание изделий,

обнаружение заеданий (например, в резьбовых соединениях), подгонка деталей с жесткими допусками (до значений допусков порядка 0,0005), сборка электронных компонентов, перемещение хрупких изделий (таких, как баллоны вакуумных ламп), захватывание мягких материалов, проверка зазоров в узлах и целостности деталей. Как отмечено в обзоре, создание машин, способных автоматически захватывать и оперировать небольшими инструментами, предназначенными для использования человеком (такими, как гаечный ключ, молоток, клещи, отвертка), будет весьма значительным достижением. По данным проведенного автором опроса была составлена некая усредненная модель перспективного тактильного преобразователя. В соответствии с этой моделью датчик должен обладать следующими характеристиками:

массивом чувствительных элементов размером 10×10, размещенным на гибкой поверхности площадью менее 1 кв. дюйма (около 6 см^2), что примерно соответствует параметрам пальцев человека;

временем реакции чувствительных элементов порядка 1—10 мс, предпочтительнее около 1 мс;

пороговым значением чувствительности каждого элемента 1 г и верхним пределом измерения усилий, равным 1000 г;

не обязательно высокой линейностью, но непременно малым гистерезисом;

повышенной стойкостью чувствительного материала датчика к воздействию среды, которая в условиях производства может быть агрессивной.

Исторически самыми первыми тактильными датчиками были обычные конечные микровыключатели, смонтированные на внутренних сторонах пальцев рабочего органа. Микровыключатель производит бинарное квантование прикладываемого усилия. Впервые упомянуто об использовании бинарного датчика в работе [9]. В работе [23] отмечено использование такого датчика для определения наличия или отсутствия детали и для центровки руки относительно изделия. В дальнейшем появились датчики усилий на основе электропроводной резины, рассмотренные в работе [12]. На внутренней стороне каждого из двух захватных пальцев робота имелось 4 таких датчика. Кроме того, каждый палец был оборудован 14-ю внешними контактными датчиками. Получаемая таким способом тактильная информация использовалась для поднятия брусков, беспорядочно размещенных на рабочем столе, и плотной упаковки их на поддоне. Пневматический датчик прикосновения [11] был впервые использован в конструкции захвата. Он имел 100 обжимных чувствительных элементов, расположенных в виде сетки с размером ячейки $0,1 \times 0,1$ дюйма (1 дюйм = 25,4 мм).

Информация, получаемая от бинарных датчиков прикосновения, весьма ограничена, ее не достаточно для измерения захватных усилий и выделения данных об объекте, находящемся между пальцами захвата. Первые аналоговые датчики, лишенные отмеченных недостатков, упомянуты в работе [15]. Тактильные преобразователи, смонтированные на внутренних сторонах захвата манипулятора, содержали матрицы размером 6×3 чувствительных элементов. Усилие на каждый элемент передавалось через упругую шайбу, которая смещала задвижку, регулировавшую световой поток между излучающим диодом и приемным фототранзистором. Матрица тактильных чувствительных элементов [28] содержит массив 8×10 иголок, способных перемещаться в плоскости, перпендикулярной к лицевой поверхности захвата, и обладает способностью анализировать форму объекта. В качестве измерителей используются потенциометры, фиксирующие расстояние между концами иголок двух противоположных матриц, установленных на внутренних сторонах пальцев захвата. Аналоговые датчики прикосновения изготавливаются также на основе углеволокна [18].

Ниже подробно рассмотрены два существенно различных подхода к построению тактильных датчиков. Оба подхода считаются перспективными и могут претендовать на коммерческий успех. Однако совершенно не обязательно, что в перспективных преобразователях усилий будут использованы именно те материалы, которые описаны в данном справочнике. В настоящее время для преобразования усилий в электрические сигналы все шире используется поливинилиден (PVF_2), обладающий пьезоэлектрическими свойствами и имеющий ряд преимуществ по сравнению с электропроводной резиной. Его преимущества заключаются в меньшем весе, большей прочности и низкой стоимости. Кроме того, он легко принимает форму любой сложной поверхности и имеет широкий динамический диапазон сигналов. Один из недостатков поливинилидена—самопроизвольная генерация электрического напряжения, возникающая за счет пироэлектрического эффекта. Однако можно надеяться, что эту трудность удастся преодолеть путем изоляции датчика от окружающей среды материалом, имеющим низкую теплопроводность. В противоположность поливинилидену электропроводная резина отличается нелинейными свойствами, низкой чувствительностью, большой инерционностью, значительным последействием и наличием гистерезиса.

13.4.1. Построение тактильных датчиков на основе упругих анизотропно проводящих материалов

В качестве примера рассмотрим конструкцию тактильного датчика [16], состоящего из интегральной матрицы, которая содержит 256 элементов. Каждый элемент матрицы имеет произвольную площадь, не превышающую 0,01 см^2, и обеспечивает независимый аналоговый сигнал в динамическом диапазоне измеряемых значений силы от 1 до 100 г. Датчик состоит из двух проволочных пластин, направления проводников в которых перпендикулярны. Обе пластины разделены тонкой эластичной прокладкой (рис. 13.8), изготовленной из материала типа плетеной нейлоновой сетки или тонкодисперсного напыленного слоя краски. Выбор материала зависит от заданного соотношения чувствительности и динамического диапазона. Контактные точки в местах пересечения проводников образуют чувствительные элементы, способные измерять локальные усилия.

Конструкция реального прибора содержит верхнюю пластину проводников, изготовленную в виде слоя упругого анизотропно проводящего силиконового каучука (АПК), и нижнюю пластину, представляющую собой печатную плату с вытравленными на ней тонкими параллельными линиями проводников. АПК обладает свойством электропроводности только в одном направлении, что достигается за счет конструктивных особенностей. Пластинка состоит из чередующихся слоев силиконового каучука толщиной по 250 мкм, одни из которых пропитаны графитом или серебром, а другие являются изолирующими. Пропитанные слои играют роль проводников (см. рис. 13.8). В рассматриваемом приборе [16] пропитанные графитом слои были дополнительно позолочены, что позволило уменьшить значения линейного сопротивления с нескольких килоом на сантиметр до 100 Ом/см. Первоначальные его значения были слишком велики для использования в датчиках. Эскиз конструкции датчика приведен на рис. 13.9. На схематическом изображении печатной платы ПП1 показано направление нанесенных на нее параллельных проводников, которые соответствуют нижней пластине на рис. 13.8. Лист АПК обернут вокруг этой платы, как показано на рис. 13.9, и прилегает за счет этого ко второй печатной плате ПП2. Плата ПП2 предназначена для формирования подводящих проводников к слою АПК.

Электрическое сопротивление (или проводимость) каждого чувствительного элемента пропорционально оказываемому на него давлению (рис. 13.10). Характер зависимо-

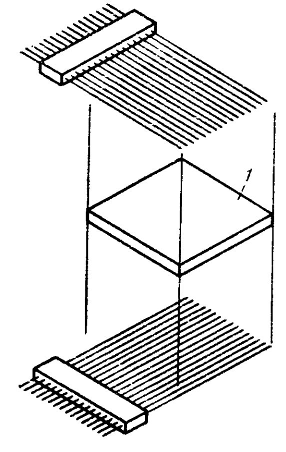


Рис. 13.8. Формирование чувствительных элементов тактильного датчика:
1 — эластичная прокладка

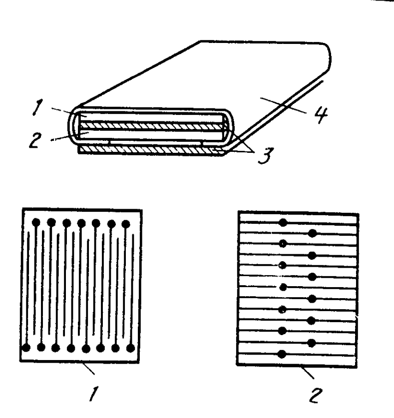


Рис. 13.9. Конструкция тактильного датчика:
1 — печатная плата 1 (ПП1); *2* — печатная плата 2 (ПП2); *3* — прижимные планки; *4* — слой анизотропно проводящего силиконового каучука

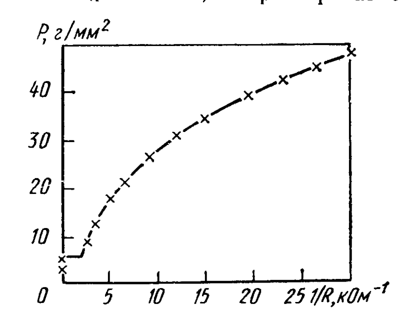


Рис. 13.10. Зависимость электропроводности материала тактильного датчика от приложенного давления

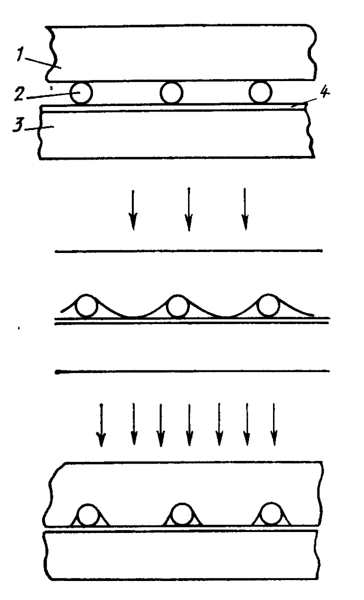


Рис. 13.11. Схематическое представление механизма изменения электрического сопротивления АПК в зависимости от приложенного давления [16] (вид сбоку):

— слой АПК; *2* — элементы прокладки; *3* — медный слой; *4* — слой позолоты

сти нелинейный, и причины такого явления еще недостаточно изучены. В работе [16] предполагается, что механизм этого явле-

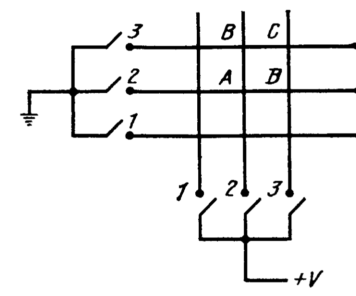


Рис. 13.12. Упрощенная электрическая схема тактильного датчика

ния заключается в том, что давление на высокоэластичный слой АПК деформирует структуру материала вокруг элементов разделительной прокладки и приводит к возникновению контакта этого материала с расположенным внизу металлическим слоем (рис. 13.11).

Тактильный образ формируется с помощью сканирования массива чувствительных элементов, которое производится путем приложения напряжения к одному из столбцов массива и измерению в этот момент токов в каждой строке (термины столбец и строка относятся к двум взаимно перпендикулярным наборам проводников, изображенным на рис. 13.8). В датчиках с низкой разрушающей способностью информацию о тактильном образе можно считывать путем непосредственного подключения отдельных проводников к каж-

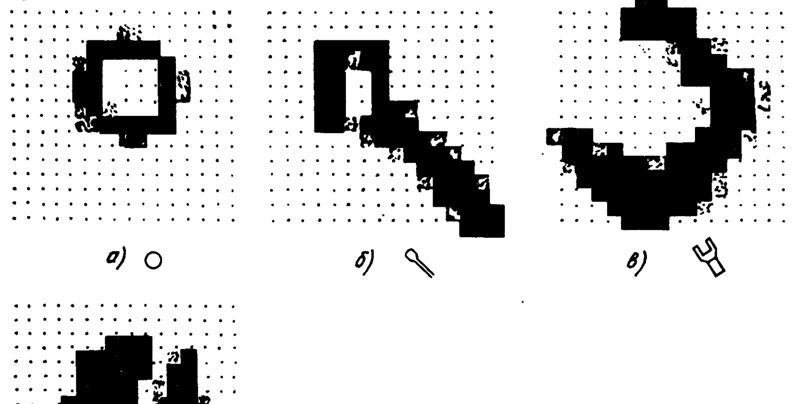


Рис. 13.13. Примеры дискретных тактильных образов:

а — кольцо диаметром 0,3 см; *б* — шплинт; *в* — лапка; *г* — головка винта со шлицем [16]

дому чувствительному элементу [5, 27]. Для иллюстрации принципа сканирования на рис. 13.12 приведена упрощенная электрическая схема такого датчика. Если усилие приложено к элементу *A*, то при сканировании поля датчика в момент, когда электрическое напряжение подается на столбец *2*, ток появится только при замыкании на землю ключа в строке *2*. Основной проблемой при реализации указанного метода является появление мнимых тактильных образов («фантомов»), вызванных самим принципом снятия данных. Это явление поясняется на примере матрицы размером 3×3 элемента (см. рис. 13.12). Если усилие приложено к элементам *A*, *B* и *C*, то элемент *D* также окажется подключенным в проводящую цепь, образованную протеканием токов от столбца *3* к строке *3* через элемент *C*, от столбца *2* к строке *3* через элемент *B* и от столбца *2* к строке *2* через элемент *A*.

Для того, чтобы избавиться от указанного явления, в работе [16] предложен так называемый метод зеркальных напряжений. Суть его заключается в том, что при подаче на определенный столбец напряжения все остальные столбцы заземляются, чтобы устранить побочные пути протекания тока. Потенциалы выводов строк также приводятся к нулю путем подачи в них токов, компенсирующих воздействие напряжения активного столбца. Тогда значения сопротивлений цепей будут обратно пропорциональны значениям подаваемых выравнивающих токов. Описанный метод эффективен только в том случае, когда измеряемые значения сопротивлений существенно превышают линейные сопротивления проводников в столбцах и строках. Примеры дискретных тактильных образов, полученных с помощью рассмотренного прибора на матрице размером 16×16 чувствительных элементов (с плотностью приблизительно 10^4 элементов на 1 $см^2$) с напыленными разделителями, приведены на рис. 13.13.

13.4.2. Построение тактильных датчиков на основе БИС

В конструкции тактильных датчиков, рассмотренной в предыдущем подразделе, для соединения отдельных чувствительных элементов со схемами обработки информации необходимо было либо иметь большое число проводников, либо размещать громоздкие схемы мультиплексоров в ограниченном пространстве в непосредственной близости от матрицы. Кроме того, если не применять локальные препроцессоры, то в основную ЭВМ приходится передавать значительные объемы информации. В данном

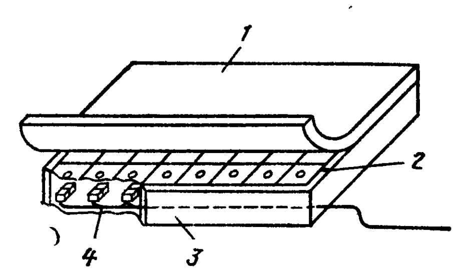


Рис. 13.14. Конструкция датчика на базе БИС:

1 — слой эластопластика; *2* — поверхностные металлические электроды; *3* — кремниевая подложка; *4* — электронные компоненты [24]

подразделе рассматривается вариант конструкции датчика, основанной на архитектуре, используемой для изготовления больших интегральных микросхем (БИС-архитектура) [24]. Такая конструкция свободна от перечисленных выше недостатков, поскольку использует присущую механическим усилиям исходно параллельную природу преобразуемых данных для построения локальных препроцессоров обработки тактильных образов.

Эскиз конструкции прибора приведен на рис. 13.14. На подложку БИС, выполненную по *n* — МОП технологии, уложен слой электропроводной пластмассы толщиной 1 мм, обладающей чувствительностью к силовому воздействию. Подложка содержит двумерный массив ячеек, имеющих размеры $1{,}6 \times 0{,}9$ мм. Каждая ячейка способна измерять приложенное локальное усилие путем регистрации значения удельного сопротивления участка пластмассового слоя, расположенного непосредственно над ней. Для измерения удельного сопротивления между двумя электродами, размещенными внутри ячейки и имеющими электрический контакт с пластмассовым слоем, задается тестовое значение тока. Полученное между ними падение напряжения сравнивается с внешним опорным напряжением и таким образом формируется сигнал, пропорциональный приложенному усилию. Пример возможной конфигурации электродов, расположенных внутри ячейки, приведен на рис. 13.15, где схематически отображен принцип измерения удельного сопротивления прилегающего участка.

Структурная схема устройства обработки преобразованных данных приведена на рис. 13.16. Помимо упомянутых электродов, размещенных в ячейке для измерения локальных усилий, в ней имеется процессор, который осуществляет предварительную обработку получаемых данных и обеспечивает связь с соседними процессорами. Связь

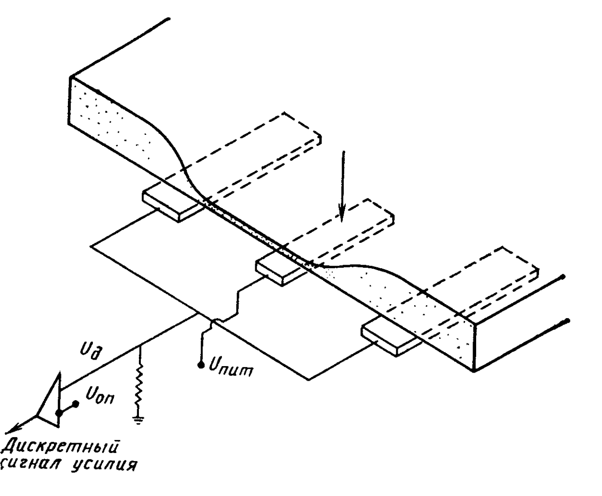


Рис. 13.15. Схема измерения удельного сопротивления эластопластика: $U_{пит}$ — напряжение питания; $U_д$ — сигнал датчика: $U_{оп}$ — опорное напряжение

между локальными процессорами необходима для реализации операции свертки тактильных образов, а также для сдвига полученной сенсорной информации от ячейки к ячейке с целью ее последующей упаковки и передачи в канал связи с центральной ЭВМ.

Функциональная схема локального цифрового процессора каждой ячейки приведена на рис. 13.17. Падение напряжения $V_{усил}$, полученное в результате пропускания тестового значения тока через прилегающий участок пластмассового слоя, сравнивается с опорным напряжением $V_{оп}$, а результат выдается в двоичном виде. (Результат измерения усилия может быть более точным и содержать не один, а большее количество битов информации. Для этого необходимо иметь несколько уровней опорного напряжения и осуществлять соответствующее аналого-цифровое преобразование.) Полученный бит измерительной информации поступает через мультиплексор в триггер для запоминания. Сигналы I_1 и I_2, подаваемые на входы управления мультиплексора, определяют, какой из четырех информационных входов будет подключен к триггеру. Поскольку в триггере могут

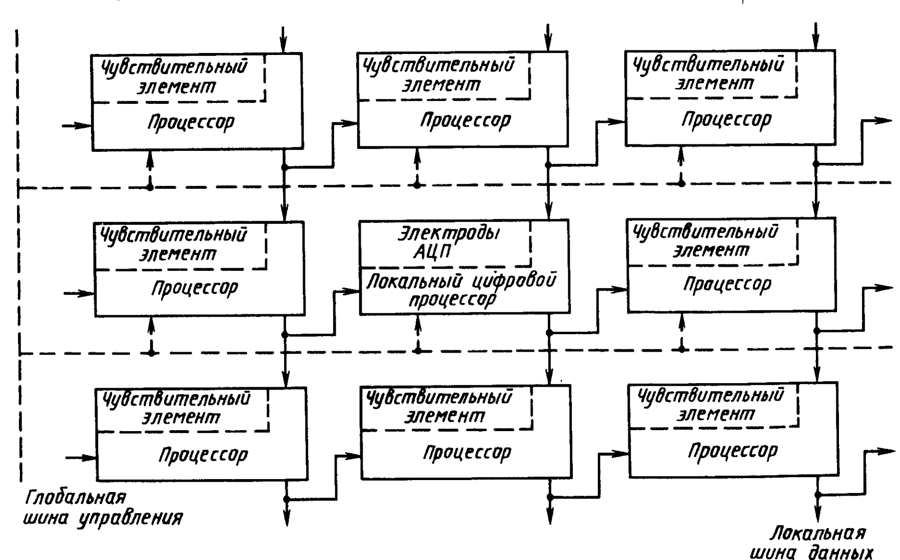


Рис. 13.16. Структурная схема устройства обработки сенсорных данных. Схема реализует операцию свертки тактильного образа [24]

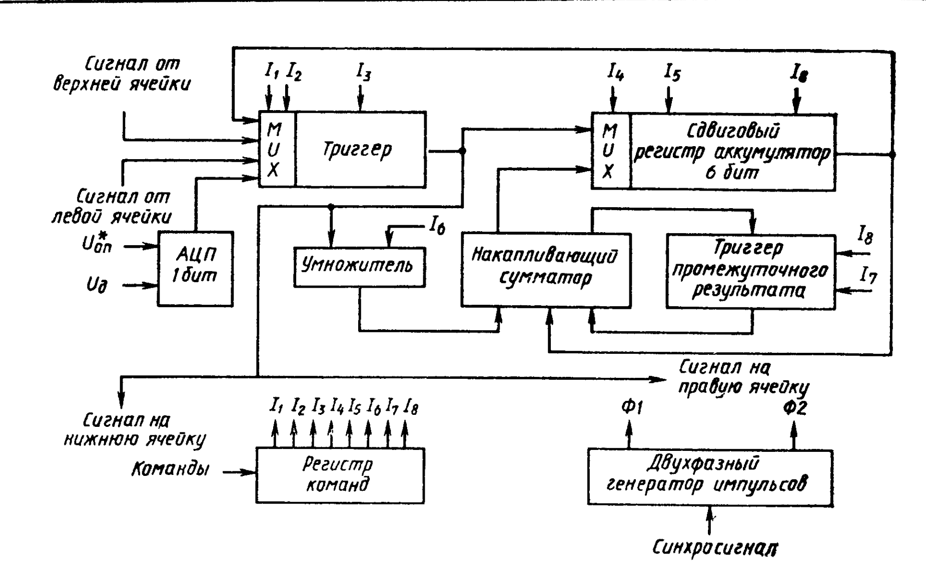


Рис. 13.17. Функциональная схема локального цифрового процессора [24]. Сигналы, помеченные *, поступают извне

запоминаться сигналы с любого входа мультиплексора, то он доступен для хранения информации соседних снизу и справа элементов. Благодаря организации таких связей между локальными процессорами легко осуществляется операция свертки следующего вида:

$$C(m, n) = \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} p(m-i, n-j)\, h(i, j), \qquad (13.1)$$

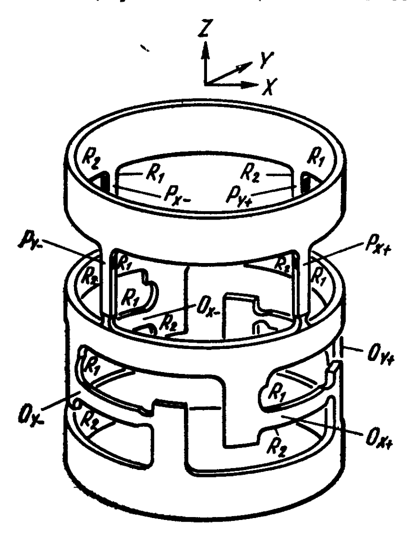
где $p(m, n)$ — преобразованные значения усилий, $h(i, j)$ — импульсная характеристика устройства взятия отсчетов. Поскольку сенсорные данные $p(m, n)$ — бинарные, то умножения, которые следует производить в соответствии с формулой (13.1), могут быть выполнены с помощью последовательности обычных сложений. На функциональной схеме (см. рис. 13.17) соответствующие коэффициенты свертки, которые также являются бинарными, представлены сигналом I_6, который поступает из регистра инструкций. Пусть, например, $h(0, 0) = 1$. Тогда на первом шаге вычисления свертки на все ячейки по глобальной шине следует передать сигнал $I_6 = 1$, считая при этом, что информация в каждом из триггеров данных уже получена. Переданный сигнал при соответствующем выборе сигнала I_4 вызовет перемещение сигналов из триггеров данных в аккумуляторы. Такое перемещение производится через сумматор, который на этом шаге фактически только копирует сигнал. Теперь запомненные данные измерений содержатся в аккумуляторах и стали доступны для соседних ячеек, расположенных справа и снизу. Установив далее для всех ячеек соответствующие значения сигналов I_1 и I_2, эту информацию можно сдвинуть, например, вправо. Предположим, что значение $h(0, 1)$ также равно 1. Опять, как и на первом шаге, на все ячейки по глобальной шине передается сигнал $I_6 = 1$, который вызывает перемещение вновь полученных данных в сумматор, где они будут сложены с данными, хранящимися в аккумуляторе. Путем повторения описанной процедуры требуемое число раз вычисляется свертка, соответствующая уравнению (13.1).

В работе [24] рассматривается изготовленная и успешно прошедшая испытания чувствительная матрица размером 6×3 элементов, а также предлагается подход к построению отказоустойчивых матриц большого размера. Проблема заключается в том, что с ростом размеров слоя активного кремния БИС увеличивается вероятность появления дефектов, приводящих к схемным ошибкам. Например, для датчика 25×25 элементов с размером одной ячейки 1×1 мм требуемая площадь слоя активного кремния составит $2{,}5 \times 2{,}5$ см, что значительно превышает размеры пластин, употребляемых при изготовлении обычных БИС. Обеспечить отказоустойчивость в матрицах большого размера можно путем введения схемной избыточности. В подходе,

редложенном в работе [24], такая избыточность вводится за счет дублирования кальных процессоров каждой ячейки и именения алгоритма, обеспечивающего бор работоспособного процессора при казе одного из них.

13.5. Датчики усилия и момента сил

Усилия и крутящие моменты, которые здействуют на манипулятор робота, мож- непосредственно измерять с помощью ломоментных датчиков, размещаемых на апфе. Конструкция такого датчика содерит несколько секций с упругими разделилями между ними. Разделители снабже- преобразователями, которые способны мерять смещения секций. Типичными пребразователями, применяемыми в силомоентных датчиках, являются тензометрие, пьезоэлектрические, магнитострикцинные, индукционные и др. [22]. Конструкя датчика усилий с тензометрическими еобразователями (рис. 13.18), разработаня в Стэнфордском исследовательском инитуте [25], состоит из секций фрезерованй алюминиевой трубки диаметром три ойма (7,6 см), соединенных восемью уптими безгистерезисными перемычками. ейка, расположенная у одного из концов ждой перемычки, передает изгибающий омент сил, увеличивающий механическое



ис. 13.18. Силомоментный датчик, разратанный в Стэнфордском исследовательом институте. Изготовлен из алюминией трубки диаметром 80 мм, имеет 8 узх перемычек, что исключает возникнове- гистерезиса [25]

напряжение на противоположном конце перемычки, которое измеряется с помощью двух фольгированных тензометров. Мостовые схемы, подсоединенные к тензометрам, обеспечивают выходной сигнал, пропорциональный составляющей силы, нормальной к плоскостям преобразователей. Кроме того, такая конструкция автоматически компенсирует тепловой дрейф. Рассмотренный датчик способен измерять все три составляющие как прилагаемых усилий, так и крутящих моментов. Другие конструкции силомоментных датчиков для запястья робота описываются, например, в работах [30, 12]. Как показано в работе [30], усилия и моменты сил можно измерять также с помощью датчиков, смонтированных на основании робота.

Усилия и моменты сил могут быть оценены косвенно путем их измерения в сочленениях манипулятора. В сочленениях, которые приводятся в действие двигателями постоянного тока, усилие пропорционально значению тока в якоре. В соединениях, приводимых гидравлическими моторами, оно пропорционально обратному давлению. Косвенный метод измерения сил в роботах-сборщиках рассмотрен в работах [17, 23]. Робот-манипулятор [17] используется для установки в отверстия валов, а манипулятор [23] выполняет сборку водяного насоса, состоящего из корпуса, прокладки и крышки, с помощью 8 винтов. В последнем случае усилия, возникающие в сочленениях манипулятора, вычисляются по значениям тока двигателей, при этом берется поправка на силы инерции и гравитации.

13.6. Чувствительные системы индикации близости

Основной задачей чувствительных систем индикации близости является бесконтактное определение наличия или отсутствия объекта в окрестности робота. Примерами сфер применения таких систем является скоростной подсчет объектов, защита персонала, индикация движения, обнаружение ферромагнитных материалов (на основе электромагнитных эффектов), контроль уровней, считывание информации с бирок, дистанционное включение конечных выключателей и ограничителей.

Несмотря на то что все визуальные и стереоскопические системы, рассматриваемые в гл. 14 и 16, могут быть использованы и для индикации близости, для этих целей применяются гораздо более простые и дешевые приборы, которые удовлетворяют предъявляемым требованиям. Некоторые из этих приборов строятся на тех же самых принципах. Например, на принципе использования инфракрасного излучения

действует датчик, изображенный на рис. 16.12; принцип приема ультразвуковых эхо-сигналов применен в датчике, который показан на рис. 16.35. В этих случаях к аппаратуре, безусловно, не предъявляется столь жестких требований по точности определения дальности. Оба прибора могут одновременно выполнять функции детекторов движения: первый датчик для этого может измерять изменения в отраженном световом потоке, а второй использует эффект Допплера в отраженных звуковых волнах. Выпускаемые промышленностью системы индикации близости используют также параметры радиоволн, индуктивные связи, магнитострикционные свойства и эффект Холла.

13.7. Заключение

В настоящей главе приведен краткий обзор современного состояния в области сенсорного оснащения робототехнических систем. В пределах отведенного объема рассмотрены задачи, решаемые роботами, обладающими таким оснащением, а также требования, предъявляемые к соответствующим системам очувствления. Кратко затронуты вопросы построения тех датчиков, которые не рассматриваются в других главах настоящего справочника. В частности, обсуждены некоторые подходы к построению систем тактильного очувствления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Albus, J. S., *Brains, Behavior and Robotics*, McGraw-Hill, New York, 1981.
2. Ando, S., Kusumoto, S., Enomot, K., Tsuchihashi, A., and Kogawa, T., Arc welding robot with sensor, *Proceedings of 7th International Symposium on Industrial Robots*, 1977, pp. 623—630.
3. Binford, T. D., Sensor system for manipulation, Heer, E., Ed., *Proceedings of 1st Conference on Remotely Manned Systems for Exploration and Operations in Space*, 1973, pp. 283—291.
4. Chironis, N. P., *Machine Devices and Instrumentations*, McGraw-Hill, New York, 1966.
5. Broit, M., The utilization of an "artificial skin" sensor for the identification of solid objects, *Proceedings of 9th International Symposium on Industrial Robotics*, March 1979.
6. d'Auria, A. and Salmon, M., Sigma: An integrated general purpose system for automatic manipulation, *Proceedings of 5th International Symposium on Industrial Robots*, 1975, pp. 185—202.
7. d'Auria, A. and Salmon, M., Examples of applications of the Sigma assembly robot, *Proceedings of 6th International Symposium on Industrial Robots*, 1976, pp. G5.37—G5.48.
8. Doeblin, E. O., *Measurement System: Application and Design*, McGraw-Hill, New York, 1966.
9. Drake, S. N., Watson, P. C. and Simunovic, S. N., High speed assembly of precision parts using compliance instead of sensory feedback, *Proceedings of 7th International Symposium of Industrial Robots*, 1977, pp. 87—98.
10. Ernst, H. A., MH-1, A computer-operated mechanical hand, *AFIPS Conference Proceedings, SJCC*, 1962, pp. 39—51.
11. Garrison, R. L. and Wang, S. S. M., Pneumatic touch sensor, *IBM Technical Disclosure Bulletin*, Vol. 16, No. 6, November 1973.
12. Goto, T., Inoyama, T. and Takeyasu, K., Precise insert operation by tactile controlled robot HI-T-HAND Expert-2, *Proceedings of 4th International Symposium on Industrial Robots*, 1974, pp. 209—218.
13. Harmon, L. D., Automated tactile sensing, *International Journal of Robotics*, Vol. 1, No. 2, 1982, pp. 3—32.
14. Harris, C. M. and Crede, C. E., *Shock and Vibration Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1961.
15. Hill, J. W. and Sword, A. J., Manipulation based on sensor-directed control: An integrated end effector and touch sensing system, *Proceedings of 17th Annual Human Factor Society Convention*, Washington, D. C., October 1973.
16. Hillis, W. D., A high-resolution imaging touch sensor, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 1, No. 2, 1982, pp. 33—44.
17. Inoue, H., Computer controlled bilateral manipulator, *Bulletin of the Japanese Society of Mechanical Engineering*, Vol. 14, pp. 199—207, 1971.
18. Larcombe, M. H. E., Carbon fibre tactile sensors, *Proceedings of 1st International Conference on Robot Vision and Sensory Controls*, 1981, pp. 273—276.

19. Lion, K. S., *Instrumentation in Scientific Research*, McGraw-Hill, New York, 1959.
20. Loughlin, C., Eye-in-hand robot vision scores over fixed camera, *Sensor Review*, Vol. 3, No. 1, 1983, pp. 23—26.
21. Nitzan, D., Assessment of robotic sensors, *Proceedings of 1st International Conference on Robot Vision and Sensory Controls*, 1981, pp. 1—11.
22. Norton, H. N., *Handbook of Transducers for Electronic Measuring Systems*, Prentice-Hall, New Jersey, 1969.
23. Paul, R. and Shimano, B., Compliance and control, in Brady M. et al., Eds., *Robot Motion*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1982, pp. 405—417.
24. Raibert, M. H. and Tanner, J. E., Design and Implementation of a VLSI Tactile Sensing Computer, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 1, No. 3, 1982, pp. 3—18.
25. Rosen, C. A. and Nitzan, D., Use of sensors in programmable automation, *Computer*, December 1977, pp. 12—23.
26. Rosen, C. A., Machine vision and robotics: Industrial requirements, in Dodd, G. G. and Rossol, L., Eds., *Computer Vision and Sensor-Based Robots*, Plenum Press, New York, 1979.
27. Stojiljkovic, Z. and Clot, J., Integrated behavior of artificial skin, *IEEE Transactions in Biomedical Engineering*, Vol. 24, 1979, pp. 396—399.
28. Takeda, S., Study of artificial tactile sensors for shape recognition algorithm for tactile data input, *Proceedings of 4th International Symposium on Industrial Robots*, 1974, pp. 199—208.
29. Wang, S. S. W. and Will, P. M., Sensors for computer controlled mechanical assembly, *The Industrial Robot*, Vol. 5, No. 1, March 1978, pp. 9—18.
30. Watson, P. C. and Drake, S. H., Pedestal and wrist force sensors for automatic assembly, *Proceedings of 5th International Symposium on Industrial Robots*, 1975, pp. 501—511.

Глава 14
СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Дж. Эйджин, университет Карнеги-Меллона, г. Питтсбург, Пенсильвания

14.1. Машинное зрение

Термин «машинное зрение» определяет техническую систему, в которой универсальная вычислительная машина или специализированное вычислительное устройство используется для обработки визуальной информации. Он подразумевает, что такая система должна содержать датчик визуальной информации, формирующий электронный или числовой аналог наблюдаемой сцены, и средства обработки, позволяющие извлекать полезную информацию из полученного представления. В качестве датчиков обычно используются телевизионные камеры или другие аналогичные приборы, однако методика обработки изображений может применяться и для данных, полученных от ультразвуковых дальномеров, в рентгеновских или лазерных сканирующих системах и в других системах подобного рода. Обработка изображений выполняется с целью идентификации, определения положения, ориентации, а также состояния находящихся в поле зрения датчика объектов. Количественная оценка параметров изображений может быть с определенной точностью произведена при помощи датчиков двумерной информации. Количественные измерения можно производить с достаточно высокой точностью с помощью линейных датчиков с высокой разрешающей способностью, размещенных на платформе, управляемой по трем координатам $X - Y - \theta$.

Машинное зрение используется в промышленности для решения множества задач, таких, как технический контроль, размещение и подсчет изделий, измерение деталей и управление промышленным манипуляторами. Несмотря на то что существующие и потенциальные сферы его применения весьма разнообразны, основные принципы построения систем технического зрения (СТЗ) остаются теми же самыми. Учитывая это, в настоящей главе основное внимание будет уделено методическим вопросам, а не конкретным применениям.

Наиболее важными характеристиками систем машинного зрения являются стоимость, быстродействие, адаптируемость и функциональные возможности. Можно ожидать, что в ближайшие 5—10 лет стоимость таких систем будет уменьшаться, а быстродействие увеличиваться во всех сферах применения за счет развития универсальной электронно-вычислительной аппаратуры. Улучшение адаптируемости и расширение функциональных возможностей СТЗ может замедлиться, поскольку эти процессы зависят от успехов в развитии теории обработки изображений.

В ряде технических отсчетов Стэнфордского исследовательского института [1, 2] рассмотрены вопросы развития промышленных систем технического зрения за последние 10 лет.

14.1.1. Выбор технических средств

В настоящее время более десятка изготовителей предлагают полные комплекты СТЗ, в состав которых входят телевизионные камеры, вычислительные машины, программное обеспечение, тестовые программы и интерфейсы с другими системами. Одной из первых на рынок вышла фирма «Мэшин интеллиндженс», которая предложила модуль обработки визуальной информации *VS*-100. Этот модуль разработан на базе модуля Стэнфордского исследовательского института и обрабатывает двухградационные изображения. Он может производить анализ сцен в терминах связных областей, определять характеристики формы независимо от положения и ориентации объекта и на их основе идентифицировать форму объектов. Управление модулем осуществляется вручную с использованием светового пера или от другой ЭВМ через внешний интерфейс.

Сегодня серийно выпускается большое число промышленных СТЗ. Однако эта область техники все еще развивается, имеется множество новых идей, при этом конкуренция на рынке довольно жесткая, а качество систем варьируется в значительных пределах. Все это заставляет потенциального пользователя такого оборудования тщательно изучать и разбираться в его особенностях, а поскольку разнообразие решаемых задач очень велико, то успешное применение какой-либо системы в одной области не гарантирует ее применимости в другой.

Прежде чем остановить свой выбор на определенной системе, необходимо дать ответы на следующие вопросы.

Какие типы камер можно в ней использовать? Действует ли в системе стандарт *RS*-170 на видеосигнал? Будет ли система работать с камерой на твердотельной линейке ячеек? Какова предельная пространственная разрешающая способность?

Какие изображения обрабатывает система: бинарные или полутоновые? Если имеется возможность обрабатывать оба типа изображений, то какие алгоритмы применимы для каждого из них?

Какие используются алгоритмы обработки? Необходимо выяснить сильные стороны и ограничения применяемого метода.

Каково быстродействие системы? Как скорость обработки зависит от сложности изображения?

Насколько доступны алгоритмы обработки, параметры системы и технические средства для управления пользователем? Реализован ли в системе язык высокого уровня, на котором можно писать прикладные программы? Есть ли программный доступ к обрабатывающим процедурам базового программного обеспечения?

Насколько сложно управление системой для оператора? Насколько высока должна быть квалификация обслуживающего персонала, ежедневно имеющего дело с системой после того, как она будет установлена и настроена изготовителем?

В чем состоит техническое обслуживание системы? Имеются ли достаточно подробные описание и инструкция по эксплуатации, позволяющие самостоятельно запустить и эксплуатировать систему? Можно ли решать возникающие технические проблемы на инженерном уровне? Каково в целом состояние сферы обслуживания в данной области?

Даже наиболее совершенные СТЗ имеют ограничения на области применения и используемые способы обработки визуальных данных. Как правило, они не могут работать с объектами, расположенными под произвольным углом зрения в трехмерном пространстве, а производят обработку только двумерных изображений. Большинство из них требует применения специальных условий освещения, а интересующие пользователя объекты должны предъявляться поочередно. Имеются системы, которые обрабатывают информацию о нескольких объектах, одновременно находящихся в поле зрения, однако изображения наблюдаемых объектов не должны перекрываться. Как правило, такие системы теряют работоспособность в условиях, хотя бы несколько отличающихся от номинальных.

В настоящее время в академических и отраслевых исследовательских институтах ведутся работы по преодолению перечисленных ограничений. К ним относятся исследования природы зрительных процессов

животных и человека, разработка методов обработки изображений, компьютерной графики, взаимодействий человек — машина, распознавания объектов, создание ЭВМ новых архитектур и датчиков новых конструкций. Ожидается, что большого прогресса в данной области можно будет достичь за счет развития существующих методов и создания специализированных БИС цифровой обработки изображений.

14.1.2. Определения

Образом называют массив элементов

$$\{p_{yx},\ y = 1, \ldots, H;\ x = 1, \ldots, W\}.$$

Каждый элемент p_{yx} массива носит название элемента разложения. Координата y соответствует номеру строки в изображении, а координата x — номеру столбца. Обе координаты x и y образуют инвертированную левостороннюю систему координат с началом в верхнем левом углу растра, в которой ось x направлена вправо, а ось y — вниз, H — это высота растра, выраженная числом строк, а W — его ширина, выраженная числом столбцов. Пространственная разрешающая способность системы определяется размером растра, выражается через число элементов в строках и столбцах и записывается, например, в следующем виде: 512×512. Разрешающая способность по яркости представляет собой число дискретных значений, которое может принимать яркость элемента разложения. Например, если $0 \leqslant p_{yx} \leqslant 63$, считается, что изображение имеет 64 градации яркости, или разрешающую способность по яркости, равную 6 бит. Если изображение может принимать только 2 градации яркости, т. е. имеет разрешающую способность 1 бит, его называют бинарным, или двоичным. Все изображения с большим числом градаций называют полутоновыми.

В настоящее время имеется несколько направлений, в которых применяются СТЗ. Значительная их часть используется для целей технического контроля. В задачи такой системы входит разделение продукции на кондиционную и дефектную. Обычно процедура контроля разрабатывается специально для каждой детали, при этом используется обычная техника программирования, предполагающая для каждого шага в обработке визуальной информации вызов модулей из соответствующих пакетов подпрограмм.

СТЗ применяются также с целью распознавания и классификации. В этом случае для каждого рассматриваемого изделия она должна определить, к какой из нескольких возможных групп оно относится, при этом может оказаться, что оно не принадлежит ни к одной из них. В систему заранее закладываются визуальные параметры всех эталонных объектов, так что классификация неизвестного объекта, находящегося в поле зрения системы, производится путем его сравнения со всеми эталонными объектами. Если банк моделей эталонных объектов формируется с помощью самой системы путем осмотра реальных предметов, такой процесс называется обучением по предъявлению. Обычно эталоны хранятся в виде набора признаков, которые представляют собой численные значения некоторых измерений. Признаки, инвариантные к положению и ориентации объекта, используются в качестве основы для сравнения образов.

СТЗ может также определять положение и ориентацию объекта, находящегося в ее поле зрения. Для этого определяется некое исходное положение каждого объекта, относительно которого находится значение смещения.

Еще одним из возможных применений СТЗ являются измерения одного или нескольких размеров детали. Точность системы визуальных измерений зависит в основном от ее разрешающей способности. Учитывая, что большинство современных датчиков изображений, используемых в СТЗ, имеют разрешающую способность, которая может обеспечить только грубые измерения, в данной главе эта задача подробно не рассматривается.

14.2. Получение образов

При подготовке сцены для восприятия СТЗ необходимо учитывать следующие факторы: ракурс, освещение, выбор камеры и ее оптической части, взаимодействие с ЭВМ.

14.2.1. Ракурс и освещение

Решающим условием успешного применения СТЗ является всесторонний учет всех перечисленных выше факторов. Хотя специфика конкретных применений накладывает определенные ограничения, основным принципом в построении СТЗ является извлечение максимума имеющейся в сцене информации.

Деталь следует размещать в центральной части поля зрения камеры. Пространственное разрешение любой системы ограничено, поэтому, чем шире ее поле зрения, тем меньше элементов разложения будет приходиться на объект при анализе. Наиболее часто применяется расположение камеры непосредственно над объектом (так называемый вид в плане). Применяется также боковое размещение с горизонтально направленной камерой (вид сбоку).

Для уверенной работы систем с бинарными образами требуется высокий контраст, однако он способствует улучшению характеристик и в системах с полутоновыми образами. С этой точки зрения для создания контрастных силуэтов удобно встречное освещение. Такое освещение может быть организовано с помощью ламп накаливания, устанавливаемых позади полупрозрачного рассеивающего экрана. Иногда для этой цели приобретает специальные установки. Для повышения равномерности освещения в таких установках применяют устройство, регулирующее расстояние между лампами и рассеивающим экраном.

Поскольку организация встречного освещения не всегда возможна, необходимо правильно выбрать фон, на котором рассматривается объект. При этом имеется только два варианта: темный или светлый фон. Очевидно, что объекты, окрашенные в светлые тона, следует предъявлять на темном фоне, и наоборот. Иногда для повышения контраста используется подсветка или применяются цветные фильтры.

Для уменьшения теней прямое освещение должно быть также рассеянным. Если темный объект расположен на светлом фоне, появляющиеся тени могут исказить воспринимаемые контуры силуэта. На светлых объектах тени могут вызывать появление в силуэте ложных зазоров и отверстий. Это особенно важно, если требуется анализировать внутренние детали объектов.

14.2.2. Выбор камеры

Существует множество различных типов телевизионных камер, однако, как правило, в СТЗ используются либо камеры на видиконах, либо на твердотельных матрицах. Видиконные камеры дешевле твердотельных, тем не менее для многих применений дополнительные затраты на такие матрицы оправдываются.

Видикон представляет собой вакуумный электронный прибор. Оптической системой изображение сцены фокусируется на заряженную фоточувствительную мишень. Под действием света электроны покидают поверхность мишени и образуют локально разряженный участок. Степень разряда участка мишени пропорциональна яркости падающего света. Сформированный в трубке электронный луч сканирует мишень и в каждой ее точке восполняет величину заряда. Тем самым он считывает оставшийся потенциальный рельеф и делает подготовку для следующего цикла формирования изображения. Обычно на активной части поверхности мишени используется 480 сканирующих строк, которые на выход подаются чересстрочно, т. е. сначала считываются все нечетные строки, а затем — перемежающиеся с ними четные строки. Каждая строка на выходе камеры представляет собой изменяющееся во времени напряжение, которое отображает потенциальный профиль соответствующей линии на мишени. Недостатками видиконов являются смещение изображения, геометрические искажения, инерционность, наличие послеизображения и малый срок службы.

Твердотельная камера содержит датчик, представляющий собой матрицу идентичных равномерно расположенных фоточувствительных элементов (ячеек). Свет, падающий на эти элементы, создает электрический заряд, который затем считывается последовательно от ячейки к ячейке. На выходе камеры появляется последовательность уровней напряжения, представляющих собой преобразованную каждой ячейкой яркость объекта. Разрешающая способность таких камер, определяемая количеством элементов в матрице, может варьировать от 40×40 до 512×512 и выше. Для обеспечения совместимости со стандартным видеооборудованием сканирование в таких камерах может быть чересстрочным, однако это не всегда необходимо. Особым типом твердотельных камер являются камеры, которые представляют собой линейку твердотельных элементов, которые в свою очередь формируют единственную строку элементов разложения. Разрешающая способность таких камер достигает нескольких тысяч элементов разложения на строку. Твердотельные камеры имеют высокую прочность, надежность и малые габариты. Уровни выходных напряжений в них совместимы с уровнями напряжений вычислительных аппаратных средств.

Типовая частота сканирования составляет 30 полных кадров в секунду. Иногда частота кадров может быть переменной и задаваться с помощью сигналов внешней синхронизации. Выходное напряжение в любом из типов камер, видиконной или твердотельной, пропорционально значению интенсивности света, проинтегрированному за время кадра, поэтому частоту кадров можно увеличить только в том случае, когда объект хорошо освещен. С другой стороны, если освещенность от объекта на мишени трубки недостаточна, уменьшая частоту кадров, можно добиться эффективной работы системы при имеющейся освещенности.

Телевизионные камеры, использующие в качестве чувствительных датчиков твердотельные матрицы или видиконы с кремние-

выми мишенями, обладают широкой спектральной чувствительностью, кривая которой имеет максимум около 800 нм, т. е. в ближней инфракрасной области спектра. Это означает, что реальная освещенность на объекте может оказаться совсем не той, которая наблюдается человеческим глазом. Этой проблемы не существует, если объект освещается люминесцентным источником, который в отличие от ламп накаливания не излучает в инфракрасной области спектра. Некоторые типы лазеров и светодиодов излучают на длине волны, близкой к 800 нм, не видимой наблюдателю, но хорошо согласующейся с характеристикой кремния. Инфракрасная, или видимая, часть спектра может быть отфильтрована с помощью соответствующего спектрального фильтра.

Форматом кадра называют отношение ширины кадра к его высоте. В вещательных телевизионных системах, гораздо более распространенных, чем СТЗ, стандартным форматом является формат 4 : 3. Форматом элемента разложения называют отношение размера элемента по горизонтали к его размеру по вертикали. Формат элемента разложения не зависит от формата кадра и может отличаться в различных камерах. Если число столбцов в изображении разделить на число строк, результат будет равен частному от деления формата кадра на формат элемента изображения. Формат элемента изображения используется при вычислении масштабных множителей S_x и S_y (см. разд. 14.6.2).

14.2.3. Оптическая система камеры

Одной из важнейших частей всей системы получения изображения является оптический объектив. Основными параметрами объективов считают фокусное расстояние и апертуру.

В телевизионных камерах главной целью смены объективов с различными фокусными расстояниями является изменение размеров поля зрения. Объективы с коротким фокусным расстоянием дают широкий угол зрения, а так называемые телеобъективы, имеющие большое фокусное расстояние, дают узкий угол зрения. Чтобы охватить заданное поле зрения, камеры с длиннофокусными объективами должны располагаться дальше от рассматриваемой сцены. При этом уменьшаются ошибки ракурса и параллакса, а камера удаляется от рабочей зоны. Однако удаление требует более устойчивого крепления камеры, поскольку даже небольшие вибрации будут вызывать пропорциональное увеличение смещений изображения.

Апертура является мерой светосилы объектива. Численно она определяется как относительное отверстие, т. е. частное от деления фокусного расстояния на эффективный диаметр объектива. Чем короче фокусное расстояние и больше диаметр линзы, тем больше света пропускает объектив. Как правило, в объективах имеется регулируемая диафрагма, которая уменьшает диаметр отверстия, тем самым численно увеличивая относительное отверстие. Апертура влияет также на глубину резкости камеры: чем шире апертура, тем меньше диапазон дальностей, в пределах которого наблюдаемый объект находится в фокусе.

Объективы, которые относятся к так называемому телевизионному типу, обычно являются менее качественными, чем объективы, предназначенные для других типов камер. Поскольку датчики телевизионных камер имеют более низкую разрешающую способность, чем, например, пленка, то более низкое качество объектива не ухудшает качества изображения.

Большинство объективов имеют цветовую коррекцию на область видимого света. Если же камера используется в инфракрасном диапазоне, то цветовой диапазон объектива оказывается несогласованным с воспринимаемым спектром. В камерах с низкой разрешающей способностью влияние этой несогласованности может быть незаметным. Однако по мере увеличения разрешения телевизионных камер их изготовители могут столкнуться с проблемой цветовосприятия и будут вынуждены разрабатывать новые объективы, предназначенные для конкретного участка спектра.

14.2.4. Интерфейсы

При работе системы телевизионная камера должна взаимодействовать с ЭВМ, производящей обработку информации. При этом интерфейсные средства должны обеспечить синхронизацию системы, аналого-цифровое преобразование и хранение промежуточных данных.

Аппаратура синхронизации необходима для установки требуемой частоты кадров (времени интегрирования), для задания скорости выдачи выходных данных и обеспечения работы аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Она используется с целью синхронизации моментов зажигания стробоскопических осветительных ламп, а также для привязки работы АЦП к частоте питающей сети, что необходимо для уменьшения мерцаний изображения.

Аппаратура преобразования сигналов в цифровую форму содержит АЦП для полутоновых изображений или пороговую схему для бинарных изображений. Быстродействие АЦП телевизионных сигналов должно быть достаточно высоким: для того, чтобы за 1/30 с преобразовать в цифровую форму изображение одного кадра, имеющего разрешающую способность 512×480 элементов разложения, тактовая частота преобразования должна превышать 7 МГц. Для большинства применений разрешающая способность по яркости 6 бит является удовлетворительной. В высококачественных телевизионных камерах может использоваться большее число градаций яркости, соответствующее, например, 8 бит.

Пороговые схемы производят сравнение входного аналогового сигнала с пороговым уровнем. Результат сравнения выдается в виде единичного сигнала, если входное напряжение превысило порог, и нулевого, если оказалось ниже. Пороговый уровень должен быть регулируемым, что реализуется либо с помощью потенциометра, либо с помощью цифроаналогового преобразователя, управляемого от ЭВМ.

Если обработка визуальной информации производится не специализированным устройством, способным функционировать в реальном масштабе времени, а универсальной ЭВМ, то для обеспечения всех последующих преобразований необходимо запомнить сформированный образ. Аппаратура интерфейса должна обеспечить либо прямой доступ к памяти ЭВМ, либо записать образ в отдельную буферную память кадра. Вариант прямого доступа в память применяется в дешевых системах, обладающих низкой разрешающей способностью и низкой скоростью обработки информации. Буферная память кадра требует дополнительных аппаратных средств, обеспечивающих обмен информацией с ОЗУ машины, но при этом она значительно разгружает доступное пользователю адресное пространство, дает возможность отображать запомненный кадр на дисплее и позволяет в дальнейшем применять технику быстрых преобразований.

14.3. Метод однострочного сканирования

Для многих применений СТЗ не требуется производить полный анализ двумерного изображения: для извлечения полезной информации из интересующей сцены бывает достаточно использовать только одну сканирующую строку. Использование однострочной развертки существенно уменьшает объем обрабатываемой информации и упрощает сам процесс обработки. Однако примеров типовых производственных ситуаций, где применимо такое сканирование, немного, так как ограничена информация, которую в данном случае можно извлечь из сигнала.

Одномерная обработка изображений часто используется при обнаружении пятен и дефектов в таких материалах, как бумага, ткань или стекло. Обычно материал перемещают перед зафиксированной камерой и тем самым формируют непрерывную повторяющуюся развертку. Таким образом, с помощью однострочной развертки просматривается вся площадь материала. При таком обзоре каждая сканирующая строка рассматривается как независимая, поэтому процесс обработки все-таки считается одномерным.

Процесс однострочного сканирования можно реализовать не только с помощью линейки твердотельных датчиков, но и другими средствами. Для этой цели можно использовать лазерный луч, падающий на вращающееся зеркало, который затем детектируется под разными углами в проходящем или отраженном свете. Для того, чтобы обеспечить падение луча строго перпендикулярно к поверхности материала, используют параболические зеркала. Лазерные сканирующие системы широко используются при изготовлении синтетических материалов.

Выходным сигналом линейки датчиков или лазерного сканирующего устройства является аналоговое переменное напряжение, которое можно обрабатывать с помощью аналоговых аппаратных средств. В качестве возможных способов такой обработки можно указать следующие:

низкочастотная фильтрация для сглаживания шумов;

высокочастотная фильтрация с целью устранения медленных изменений сигнала, возникающих, например, вследствие неравномерности освещения;

дифференцирование с целью подчеркивания границ;

интегрирование для получения среднего уровня яркости;

маскирование с целью устранения постороннего фона.

Как правило, последним этапом, заключающим предварительные виды обработок, является пороговое сравнение. Сигнал, превысивший порог, считается соответствующим дефекту. При наличии такого сигнала в простейших устройствах производится только его индикация, а в более сложных системах осуществляется дальнейший анализ с целью выявления причины или типа дефектов, подсчета их количества или дальнейшей проверки.

Иногда при одностpочном сканировании применяется метод сравнения с эталоном [4]. Для формирования эталона производится сканирование известного объекта в

фиксированном положении. При этом образуется сигнал определенного вида. С помощью простейшей обработки в таком сигнале фиксируются все характерные признаки. Дальнейший контроль основан на выявлении наличия в сигнале от исследуемого объекта всех таких признаков. Учитывая размеры и местоположение признаков, можно осуществлять измерение и производить классификацию.

14.4. Метод прямого сравнения

Метод прямого сравнения представляет собой определенную методику обработки образов, заключающуюся в том, что один образ (или его часть) непосредственно вычитается из другого образа (или его соответствующей части). Как правило, в этом случае один из образов служит моделью, или эталоном, а другой является неизвестным, анализируемым. В производственных условиях возникает два вида ситуаций, в которых применим метод прямого сравнения. Во-первых, он используется тогда, когда необходимо удостовериться, что образ объекта (или его бо́льшая часть) соответствует заданным нормам. Во-вторых, он используется для обнаружения и определения положения заданных признаков, которые в дальнейшем анализируются на более высоких иерархических уровнях обработки (см. разд. 14.9.2).

Метод прямого сравнения основан на использовании некой меры разности двух образов. Для двух данных образов $\{p_{yx}\}$ и $\{q_{yx}\}$ разность определяется как $d_{yx} = p_{yx} - q_{yx}$. Для формирования обобщенного критерия или меры разности двух образов возможно несколько комбинаций из частных разностей, полученных от каждого из элементов разложения.

Общее число частных разностей, превысивших порог T:

$$D_0 = \sum_{x,\, y} \tau\,(p_{yx} - q_{yx}),$$

где $\tau(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } |x| > T; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$

Сумма абсолютных значений разностей

$$D_1 = \sum_{x,\, y} |\, p_{yx} - q_{yx} \,|.$$

Сумма квадратов разностей

$$D_2 = \sum_{x,\, y} (p_{yx} - q_{yx})^2.$$

Простая численная мера поэлементного подобия образов достоверна только тогда, когда объекты строго зафиксированы, так что в их местоположении нет никаких определенностей. Примером может служить контроль выходных параметров технологических процессов с высокой степенью повторяемости, таких, как печатание, вырубка, штамповка, маркирование. Если некоторая мера разности между образом детали и заранее заложенным эталонным образом превысит заданный порог, деталь следует считать бракованной.

Для того, чтобы ослабить жесткие требования к позиционированию деталей при сравнении, вводится некоторая «зона нечувствительности» в образе. Особенно просто это осуществляется на двоичных образах. Существует много способов введения таких зон. Наиболее простым из них является выделение некоторого массива данных, непосредственно определяющих, какие именно частные разности между элементами разложения двух образов должны участвовать в формировании критерия, а какие нет. Иногда для этого учитываются конкретные особенности производственного процесса, в котором осуществляется контроль. Для создания узкой зоны нечувствительности, расположенной по контуру детали, применяют масштабирование (увеличение и сжатие) эталонного образа (см. разд. 14.7). В большинстве встречающихся на практике ситуаций невозможно обеспечить установку деталей с точностью до элемента разложения. Для того, чтобы в этом случае воспользоваться методом непосредственного сравнения, необходимо предусмотреть возможность сдвига одного изображения относительно другого и обеспечить процедуру поиска, позволяющую находить такие значения сдвигов, которые минимизировали бы общее значение разности образцов. С этой целью необходимо сдвигать эталонный образ q на вектор (u, v), при этом разность сигналов для каждого элемента разложения будет функцией от сдвига: $d = p_{yx} - q_{y+v,\, x+u}$. Общие значения разности образов в соответствии с рассмотренными критериями примут следующий вид:

$$D_0(u, v) = \sum_{x,\, y} \tau\,(p_{yx} - q_{y+v,\, x+u});$$

$$D_1(u, v) = \sum_{x,\, y} |\, p_{yx} - q_{y+v,\, x+u} \,|;$$

$$D_2(u, v) = \sum_{x,\, y} (p_{yx} - q_{y+v,\, x+u})^2.$$

Предполагается, что суммирование производится по тем частям образа, которые перекрываются.

Третий критерий D_2 представляет собой квадрат евклидовой разности между образами. Несмотря на то что сложность его

вычисления выше, чем других критериев, он обладает весьма полезными свойствами. Разложим сумму следующим образом:

$$D_2(u, v) = \sum_{x,\, y} p_{yx}^2 + 2 \sum_{x,\, y} p_{yx} q_{y+v,\, x+u} + \sum_{x,\, y} q_{y+v,\, x+u}^2.$$

Первое слагаемое в формуле носит название энергии изображения, второе называется взаимной корреляцией, а третье — энергией эталона. Если размеры эталонного образа таковы, что он полностью помещается в поле зрения системы, то его энергия не зависит от сдвигов u и v. Если предположить, что энергия исследуемого изображения также постоянна в пределах интересующей области, то взаимная корреляция полностью определяет критерий $D(u, v)$. Если в решаемой задаче нельзя принять энергию исследуемого изображения постоянной, то функцию взаимной корреляции следует разделить на корень квадратный из энергии изображения и получить так называемую нормированную функцию взаимной корреляции.

Определение разности образов достаточно трудоемко с вычислительной точки зрения. Для этого надо взять некоторые значения u и v, оценить их разность, а затем повторять эту процедуру для других значений сдвигов u и v, пока не будет перекрыт весь их возможный диапазон. Поэтому всегда имеется противоречие между размером эталонного образа и пространством поиска. Когда размер эталона велик, как в задаче контроля продукции, процедура вычисления разности становится дорогостоящей, поэтому пространство поиска следует выбирать малым. Для того, чтобы ограничить пространство поиска, целесообразно произвести предварительную обработку с тем, чтобы заранее определить отправную точку измерения. Если же размеры эталона невелики, возможно будет целесообразным использовать специализированное вычислительное устройство для определения оптимальных значений u и v за один цикл просмотра изображения.

Иногда для размещения эталонных изображений применяют средства когерентной оптики. Однако обсуждение этих методов выходит за рамки данной главы. Дополнительную информацию по этому вопросу читатель найдет в работе [6].

Методика непосредственного сравнения двух образов или же образа и эталона может быть успешно использована только для определения сдвига между ними. Если же они повернуты друг относительно друга, задача существенно усложняется. Единственным выходом в данном случае является использование целого набора эталонных образов для всех ориентаций объекта.

14.5. Анализ связности

Для успешного решения многих задач вполне достаточно использовать двоичные образы. В случае, когда условия производства допускают использование двоичных образов, их обработка осуществляется достаточно быстро и надежно, что достигается за счет экономного описания данных и помехоустойчивости алгоритмов обработки.

Компактность данных обеспечивается за счет двухградационного представления отсчетов яркости. В этом случае буферная память образа представляет лишь одноразрядную матрицу. Если информация об изображении хранится в виде байтов или слов, состоящих из отдельных двоичных отсчетов, то ее объем будет составлять 1/8 от объема памяти, требуемого для запоминания полутонового изображения, в котором яркость каждого отсчета кодируется восемью битами (одним байтом). Дальнейшего повышения экономичности описания информации можно добиться применением кодирования длин серий. Однако главное преимущество экономичного описания данных заключается не в экономии памяти, а в повышении эффективности обработки.

Высокая помехоустойчивость обработки обусловлена топологическими свойствами двоичных образов. Поскольку такие образы могут быть разделены на связные области лишь единственным образом, то нет никакой неопределенности при установлении принадлежности силуэта. Кроме того, такие понятия как «включения», определяются совершенно однозначно.

Однако при неблагоприятных условиях формирования образов эти достоинства оборачиваются недостатками. Зашумленные образы с низким контрастом и перекрывающимися объектами весьма сложно обрабатывать методами бинарной обработки.

14.5.1. Кодирование длин серий

Применяемый при обработке образов метод кодирования длин серий основан на свойстве их пространственной коррелированности. Как правило, в любой строке двоичных образов содержатся длинные цепочки последовательно идущих единиц или нулей. Экономичность описания данных в этом методе достигается за счет того, что при кодировании запоминаются только номера элементов, на которых происходит смена двоичных значений.

Формализуя изложенное, можно записать, что кодированное данным методом представление R_y некоторой строки y двоичного образа есть набор элементов

$$R_y = \{x \mid p_{y(x-1)} \neq p_{yx}\}.$$

Элементы p_{yx} полагаются равными 0 вне диапазона значений $1 \leqslant x \leqslant W$.

Множество R_y всегда имеет четное число элементов, так как оно равно удвоенному числу серий, состоящих из последовательностей единиц. Строка, состоящая из одних нулей, будет представлена двухэлементным пустым множеством { }. Строка, состоящая из одних единиц, будет представлена двучленным множеством $\{1 W + 1\}$.

Следует заметить, что в приведенном представлении в явном виде нигде не предполагается однозначное соответствие уровню черного цвета единичного значения, а уровню белого — нулевого, или наоборот. Выбор зависит от соотношения цветов объекта и фона. В настоящей главе принято, что нулевое значение соответствует сигналу от фона.

Эффективность метода кодирования длин серий по сжатию данных зависит от структуры изображения. Для примера рассмотрим поле образа из 256×256 элементов разложения, для кодирования номера столбца, в котором требуется 1 байт. Предположим, что для кодирования всех переходов на строке или для подсчета их количества требуется еще один байт. Тогда для кодирования указанным методом изображения круга диаметром 128 элементов потребуется 512 байтов, в то время как поэлементное кодирование потребует 8192 байта. С другой стороны, для наихудшего изображения, состоящего из поэлементно изменяющихся нулей и единиц, метод кодирования длин серий потребует 65 792 байта.

Однако основной причиной применения сжатия данных является не экономия памяти. Гораздо больший эффект сжатие может оказать на сокращение времени обработки, поскольку чем меньше данных, тем они быстрее обрабатываются. Эффективность рассматриваемых алгоритмов определения связности и выделения признаков в значительной степени определяется тем фактом, что по предположению информация об объекте заключена в контурах и поэтому именно контуры и следует обрабатывать.

14.5.2. *Общее понятие о связности*

Целью анализа связности является разделение образов множества объектов, находящихся в поле зрения, а также выделение областей, соответствующих шумовым выбросам или посторонним объектам. Связные элементы образуют некую область, называемую пятном. Пятна представляют собой области, состоящие из соприкасающихся единичных или нулевых элементов. Они могут представлять собой объекты, отверстия в них или же общий фон. На рис. 14.1 приведены примеры, иллюстрирующие приведенные понятия. На изображении содержатся 5 черных и 4 белых пятна, а также общий фон. Все пятна (кроме фона) окружены другим пятном, контрастным данному. Два черных пятна большого размера изображают шатун и шестигранную гайку. Три белых пятна среднего размера соответствуют отверстиям в указанных деталях. Оставшиеся 4 малых пятна являются зашумленными элементами, которые могли возникнуть в образе из-за загрязненности оптических поверхностей или бликов. Один из шумовых элементов образовал отверстие в шатуне, другой — темное включение на фоне отверстия.

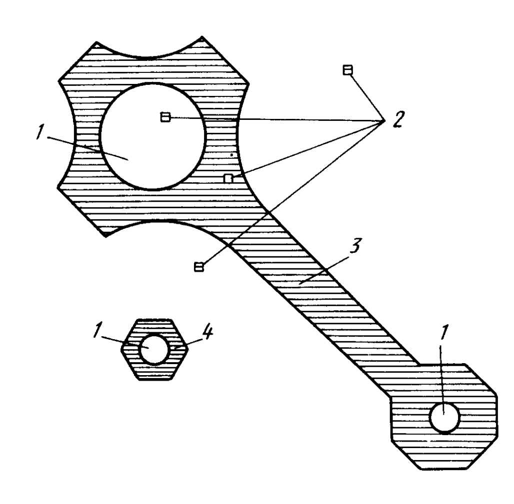


Рис. 14.1. Иллюстрация понятия связности. Каждое пятно окружено другим пятном, контрастным ему:
1 — отверстие; *2* — шумовые элементы; *3* — перемычка; *4* — гайка

Определим, что два элемента $p_{y_1x_1}$ и $p_{y_nx_n}$ считаются принадлежащими одному и тому же пятну, если они одного цвета и если существует некий «путь» (последовательность элементов $p_{y_1x_1}, p_{y_2x_2}, \ldots, p_{y_nx_n}$), такой, что все элементы этой последовательности того же цвета, а каждая их пара $p_{y_kx_k}$ и $p_{y_{k+1}x_{k+1}}$ соседние элементы. В данном случае большое значение имеет само определение соседства элементов. Если считать соседними элементы, соприкасающиеся только в горизонтальном и вертикальном направлениях, то образованные ими области будем называть 4-связными. На рис. 14.2 показаны все элементы, соседние данному элементу разложения, для 4-связной области. Если в понятие соседства включать диагональные соединения, то такие области будем называть 8-связными (рис. 14.3).

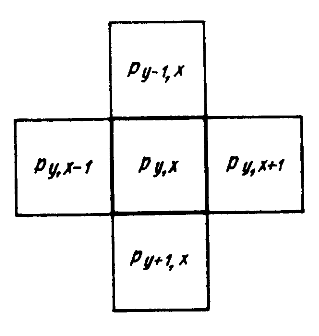


Рис. 14.2. К определению 4-связной окрестности

Понятие связности применимо к элементам, которые кодируются как единичными сигналами, так и нулевыми. Основным свойством связных областей является то, что каждая такая область (кроме общего фона) должна быть окружена другой областью противоположного цвета. Добиться этого можно, полагая единичные области 8-связными, а нулевые — 4-связными (или наоборот). Того же результата можно достигнуть, введя 6-связные области (рис. 14.4), в которых связными считаются элементы, размещенные по диагонали, идущей слева снизу направо вверх, но не по другой диагонали. Достоинством такого определения связности является инвариантность к цвету элементов. Алгоритм определения связности, рассматриваемый далее,

$p_{y-1,x-1}$	$p_{y-1,x}$	$p_{y-1,x-1}$
$p_{y,x-1}$	$p_{y,x}$	$p_{y,x+1}$
$p_{y+1,x-1}$	$p_{y+1,x}$	$p_{y+1,x+1}$

Рис. 14.3. К определению 8-связной окрестности

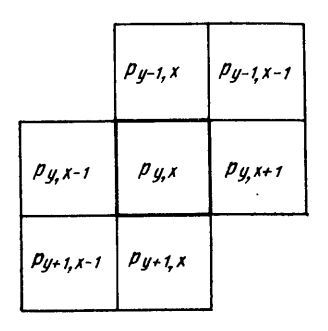


Рис. 14.4. К определению 6-связной окрестности

основан именно на таком 6-связном определении.

Анализ связности предполагает приписывание каждому пятну индивидуального идентификатора. В этом случае каждый элемент, принадлежащий данному пятну, может быть обозначен этим идентификатором. Процесс идентификации можно представить себе начинающимся с единичного или нулевого элемента, которому приписывается некоторый номер. Далее в процессе обработки каждому непомеченному и несвязанному элементу приписывается новый номер. Этот новый номер будет последовательно распространяться на соседние элементы до тех пор, пока пятно не закончится. После этого отыскивается следующий непомеченный и несвязный элемент, маркируется новое пятно и так далее до тех пор, пока все элементы не будут маркированы.

Существуют и более быстрые методы обработки образов. Можно определить связность и дифференцировать пятна за один цикл сканирования. При этом анализируется сразу целая строка, которая сравнивается с предыдущей строкой изображения. На любой стадии анализа формируется

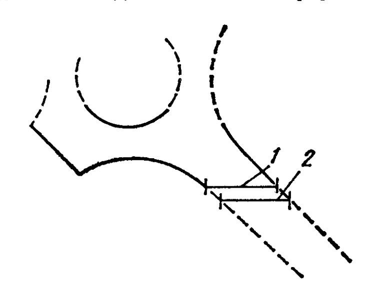


Рис. 14.5. Определение связности по перекрытию отрезков. Отрезки перекрываются:
1 — предыдущий отрезок; *2* — анализируемый отрезок

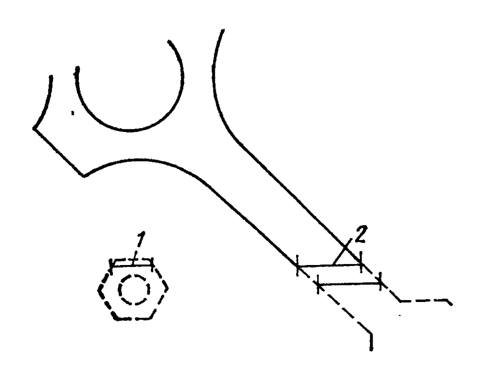


Рис. 14.6. Определение связности по перекрытию отрезков.

Анализируемый отрезок *1* расположен левее предыдущего *2*, связность отсутствует

структура данных, которая отображает текущее состояние обработанного образа. Связность отрезков элементов определяется по перекрытию с элементами каждой серии предыдущей строки и результат добавляется к созданной структуре данных. Здесь следует рассмотреть три случая. Если новый отрезок перекрывается с отрезком предыдущей строки, то считается, что он продолжает уже обнаруженное пятно (рис. 14.5). Если новый отрезок расположен левее отрезка предыдущей строки, то считается, что он является верхом еще не обнаруженного пятна, т. е. он начинает пятно (рис. 14.6). Если уже имеющийся отрезок оказывается левее нового, то, следовательно, он не продолжается на новой строке и принадлежит пятну, которое должно быть закончено (рис. 14.7). Окончание пятна подразумевает, что элементы противоположного цвета, расположенные по обеим сторонам этого отрезка, должны быть объединены в другое пятно.

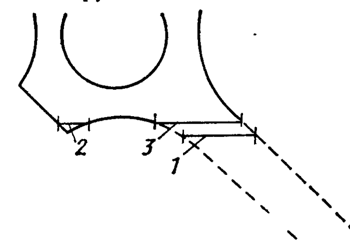


Рис. 14.7. Определение связности по перекрытию отрезков. Анализируемый отрезок *1* лежит правее первого предыдущего отрезка *2*, следовательно, отрезок *2* завершает пятно, а два контрастных ему пятна по обеим сторонам должны быть объединены. Затем производится аналогичное сравнение со вторым предыдущим отрезком *3*

14.5.3. Алгоритм определения связности

При определении связности используются несколько типов данных *.

Дескриптор контура представляет собой динамически размещаемый блок данных, каждое из которых содержит два числа: номер столбца и идентификатор пятна.

Дескриптор пятна также представляет собой динамически размещаемый блок данных, содержащих, по крайней мере, одно число — номер строки, где пятно начинается. Другие поля в блоке дескриптора пятна используются для хранения дополнительной информации о его размере, форме, местоположении и т. д. Индикатор пятна является указателем на дескриптор.

Зафиксированная в памяти информация содержит также следующие данные: список обрабатываемых пятен, являющийся заголовком для списка идентификаторов пятен; номер текущей строки, являющийся заголовком упорядоченного списка дескрипторов контуров. Текущий указатель контура есть указатель конкретного контура в этом списке. Указания «предшествующий контур» и «последующий контур» относятся к дескрипторам контуров, которые непосредственно предшествуют или следуют за данным контуром в текущей строке.

Результатом анализа изображения на связность является не только список номеров пятен. Одновременно с анализом связности в процессе обработки получают информацию о размерах, форме, местоположении и других характеристиках пятна, которую можно также упаковать и затем извлекать из дескриптора пятна. Этот вид предварительной обработки информации для получения параметра фигур рассматривается в последующих разделах. При анализе связности можно определить 5 этапов обработки: инициализацию, продлевание, зарождение, завершение и слияние. Эти этапы рассмотрены ниже.

---

* При реализации этого алгоритма широко используются связные списки и динамическое распределение памяти. Если применяемый язык программирования не допускает использования переменных-указателей и динамического распределения памяти, то для каждого типа данных значительный объем памяти в виде одного или нескольких массивов должен быть зарезервирован априорно, а индексы соответствующих массивов могут использоваться как указатели. Списки можно интерпретировать как массивы указателей. Введение или устранение элементов в массивах потребует сдвига данных.

Алгоритм анализа изображения на связность состоит из следующих шагов.

1. Инициализировать список обрабатываемых пятен.
2. Создать дескриптор пятна, обозначающего фон. Приписать номеру строки, где начинается фон, отрицательное число.
3. Вызвать текущую строку, содержащую два дескриптора контура. Первый из дескрипторов должен иметь в качестве указателя номера столбца число меньше нуля, а идентификатор пятна должен соответствовать фону. Во втором дескрипторе номеру столбца следует приписать большое положительное число, а его идентификатор пятна не определен.
4. Если необходимо, выполнить дополнительную операцию инициации.
5. Выполнить обработку строк образа по порядку, начиная с верхних строк растра, в соответствии с алгоритмом, описанным ниже.
6. Закончить процесс обработки строк на дополнительно введенной последней пустой строке растра, состоящей из одних нулей.

Алгоритм обработки строк. 1. Вызвать текущий указатель контуров и выбрать первый дескриптор контура на строке.

2. Получить представление текущей строки методом кодирования длин серий (см. разд. 14.5.1). Предварить полученный список некоторым отрицательным числом, а в конце добавить большое положительное число.

3. Для каждой пары соседних чисел, полученных в результате кодирования длин серий, произвести обработку отрезков в последовательности слева направо, как определено в следующем подразделе. [Например, если полученная кодированием серия состоит из следующих чисел (—1, 1, 2, 3, 4, 99), то процессор обработки отрезков будет вызван 5 раз и будет производить обработку отрезков со следующими аргументами (—1, 1); (1, 2); (2, 3); (3, 4); (4, 99).]

4. Если в конце указатель обрабатываемого контура соответствует не последнему зафиксированному на текущей строке контуру, то произвести операцию исключения в соответствии с алгоритмом, изложенным ниже, и повторять ее до тех пор, пока указатель не будет соответствовать последнему контуру.

Алгоритм обработки отрезков. Исходными данными являются номера начального и конечного столбцов.

1. Если номер начального столбца больше или равен номеру столбца последующего контура, следует произвести операцию исключения, определенную ниже, и повторять ее, пока выполняется это условие.

2. Если номер конечного столбца меньше, чем номер столбца текущего контура, включить данный отрезок в список, присвоив соответствующие номера его начальному и конечному столбцам.

3. При необходимости — выполнить операцию продлевания.

4. Присвоить текущему столбцу номер начального столбца.

5. Переставить указатель текущего контура на дескриптор следующего контура в текущей строке.

Алгоритм включения в список и присвоения номеров начального и конечного столбцов. 1. Вызвать идентификатор пятна, содержащийся в предыдущем дескрипторе контуров. Присвоить этому пятну наименование «окружающее».

2. Создать дескриптор нового пятна, присвоив ему наименование «новое». Присвоить начальной строке этого пятна номер, соответствующий номеру обрабатываемой строки.

3. Разместить два описания новых контуров, включив их в список непосредственно после текущего контура. Первое из этих описаний представляет собой новый идентификатор пятна и номер начального столбца. Второе описание представляет собой дескриптор окружающего пятна и номер конечного столбца.

4. При необходимости повторить обработку зарождающихся контуров.

Алгоритм исключения из списка. 1. Вызвать идентификаторы пятен из предыдущего, текущего и последующего дескрипторов контуров. Присвоить им наименования соответственно левое, завершающееся и правое пятно.

2. Если идентификаторы левого и правого пятен совпадают, то включить идентификатор завершающегося пятна в общий список. При необходимости — повторить данную операцию на строке. В противном случае провести операцию слияния, которая определена ниже.

3. Удалить текущий и последующий контуры из действующего списка. Перевести указатель текущего контура на первый контур, расположенный за удаленными.

Алгоритм слияния. 1. Сравнить начальные номера строк левого и правого пятен. Пятно с меньшим номером назовем старым, а другое — новым.

2. При необходимости — повторить данную операцию.

3. По всей текущей строке произвести поиск всех точек, где следует изменить идентификатор пятна с нового на старый.

4. Поскольку ни одна из представленных теперь структур данных не указывает на

новое пятно, его можно исключить, а занимаемое им место вернуть в список свободной памяти.

14.5.4. *Упрощенный метод анализа связности*

Для разделения всего образа на отдельные пятна может быть использован упрощенный вариант описанного выше алгоритма [7]. Единственной структурой данных, требующейся для его реализации, является массив для хранения номеров пятен. При этом для получения каких-либо характеристик образа требуется его повторное сканирование.

Однако, вместо того чтобы давать детальное описание этого упрощенного алгоритма, рекомендуем читателю внимательно ознакомиться с общими принципами, изложенными в предыдущем разделе. Отличия этого алгоритма и упрощения заключается в следующем.

Пусть некая строка массива номеров пятен является текущей. Операция включения при этом заключается только в выборе малого целого числа для вновь появляющегося идентификатора пятна и в приписывании этого числа соответствующим элементам образа на последующей строке массива номеров пятен. Операция продлевания заключается в приписывании одного и того же номера пятна нескольким последующим элементам. Операция слияния элементов может осуществляться либо повторным проходом уже обработанной части массива с целью замены у соответствующих элементов старого идентификатора на новый, либо при помощи дополнительной структуры данных, называемой таблицей эквивалентности.

14.6. Признаки двоично-квантованных фигур

Одним из существенных факторов, побуждающих использовать при обработке изображений двоичное квантование и анализ связности, является возможность определять признаки каждой рассматриваемой фигуры. Все представляющие интерес признаки подразделяются на две категории: инвариантные к положению и ориентации и неинвариантные. Примерами инвариантных признаков могут служить площадь, периметр, относительное удлинение или количество отверстий в силуэте фигуры. Эти признаки могут использоваться для распознавания объектов. Примером признаков другой группы являются центроид фигуры (центр площади) и всевозможные меры угловой ориентации.

Большинство признаков фигур может быть определено при анализе связности. Некоторые из признаков получаются непосредственно в процессе анализа, другие же требуют двухэтапной обработки: например, набора статистических характеристик фигур во время анализа на связность и их последующего анализа и обработки. Статистические характеристики хранятся в дескрипторах пятен. В данном разделе рассмотрены описания статистических данных, получаемых при реализации алгоритма определения связности.

14.6.1. *Элементарные признаки*

Простейшим признаком фигуры является ее цвет. Он требует одного бита памяти в дескрипторе пятна. При инициализации процесса обработки цвету фонового поля приписывают нулевое значение. В дальнейшем в процессе зарождения новых пятен их цвет устанавливают противоположным цвету окружающего пятна.

Достаточно просто получить соотношения вложенности. Каждый дескриптор пятна должен иметь «порождающее» поле, которое указывает на окружающее пятно. Дополнительные указатели должны быть предусмотрены для «дочерних» и соседних пятен, причем если количество пятен в рассматриваемой сцене невелико, эти отношения могут быть определены при просмотре списка обрабатываемых пятен. В процессе создания нового пятна указатель на родителя следует установить на окружающее пятно. Для осуществления операции слияния необходимо просмотреть всю текущую строку и весь список обрабатываемых пятен. При этом если указатель какого-либо из пятен указывает на новое пятно как на порождающее, то в его соответствующем поле следует изменить указатель на старое пятно.

Для описания охватывающего прямоугольника требуется 4 поля в дескрипторе пятна: для минимальной и максимальной координат по оси x и соответствующих координат по оси y. В процессе зарождения пятна минимальному значению координаты по оси y присваивают номер текущей строки, минимальному значению координаты по оси x — некоторое большое положительное число, а максимальному значению координаты по оси x — отрицательное число. В процессе продлевания производят сравнение начального и конечного номеров столбцов с хранящимися минимальным и максимальным значениями координат x и при необходимости обновляют их. При осуществлении операции слияния сравнивают-ся минимальные и максимальные значения координат по оси x старого и нового пятен и в дескриптор старого пятна записываются скорректированные значения. В процессе завершения максимальной координаты по оси y приписывают также номер текущей строки.

Значения максимальных координат по осям x и y фактически соответствуют следующему элементу и следующей строке после окончания фигуры, следовательно, для точного определения координат, соответствующих объекту, эти значения следует уменьшить на единицу, прежде чем их использовать. Одним из параметров, характеризующих положение пятна, может служить центр охватывающего прямоугольника, координатами которого являются средние значения максимальных и минимальных координат по соответствующим осям.

14.6.2. *Интегральные моменты площади фигур*

Моменты площади фигуры определяются как суммы, вычисленные по всем элементам пятна, различных произведений координат x и y. Собственно площадь может быть представлена как момент площади нулевого порядка и обозначена как $\sum 1$. Имеются 2 момента первого порядка, обозначаемых $\sum x$ и $\sum y$, и 3 момента второго порядка, обозначаемых соответственно $\sum x^2$, $\sum xy$, $\sum y^2$. Для всех моментов, которые используются при решении конкретной задачи, необходимо отвести соответствующее поле в дескрипторе пятна.

Следует отметить, что приведенные в данном разделе формулы могут применяться при обработке как образа в целом, так и отдельных пятен, а также для вычисления характеристик совокупностей пятен. Если исследуемое изображение состоит только из «интересующих» элементов, то вычисление моментов площади не обязательно должно сопровождаться определением связности.

Если изображение обработано методом кодирования длин серий, то для вычисления моментов можно использовать приведенные ниже формулы, позволяющие производить суммирование координат не поэлементно, а сразу отрезками:

$$\sum_{x=m}^{n-1} 1 = n - m;$$

$$\sum_{x=m}^{n-1} x = \frac{n^2 - n}{2} - \frac{m^2 - m}{2} = \frac{1}{2}(n-m)(m+n-1);$$

$$\sum_{x=m}^{n-1} x^2 = \frac{2n^3 + 3n^2 + n}{6} - \frac{2m^3 + 3m^2 + m}{6} = \frac{1}{12}[3(n-m)(n+m-1)^2 + (n-m)^3 - (n-m)];$$

$$\sum_{x=m}^{n-1} xy = y \sum_{x=m}^{n-1} x = y(n-m)(m+n-1);$$

$$\sum_{x=m}^{n-1} y^2 = y^2 \sum 1 = y^2 (n-m).$$

Для вычисления первых и вторых моментов в процессе зарождения пятна сначала все 6 накапливающих сумматоров следует установить в нулевое состояние. При проведении операции продлевания суммирования следует производить в соответствии с приведенными формулами. При операции слияния накопленные значения моментов старого и нового пятен следует сложить и записать в дескриптор старого пятна.

Если при обработке пятен для вычисления моментов используется арифметика целых чисел с фиксированной запятой, необходимо обеспечить достаточную точность и объем памяти, требуемый для хранения больших значений накопленных сумм. Для изображения размером $n \times n$ элементов максимальное значение момента $\sum 1$ составит n^2, моментов $\sum x$ и $\sum y$ — $(1/2)\,n^3$, моментов $\sum x^2$ и $\sum y^2$ — $(1/3)\,n^4$, а момента $\sum xy$ — $(1/4)\,n^4$.

14.6.3. *Использование моментов площади. Центроид и аппроксимирующий эллипс*

Предположим, что известны масштабные коэффициенты S_x и S_y, задающие размеры пространственных элементов образа по горизонтальной и вертикальной осям. Они представляют собой расстояния, на которые переместится точка на рассматриваемой сцене при ее перемещении на один элемент по соответствующей оси в образе и могут быть выражены в любых удобных единицах — миллиметрах, дюймах или любых других. Используя эти коэффициенты, можно вычислить площадь A и координаты центроида (C_x, C_y) объекта по следующим

формулам:

$$A = S_x S_y \sum 1;$$
$$C_x = S_x \sum x / \sum 1;$$
$$C_y = S_y \sum y / \sum 1.$$

Идеальный эллипс определяется пятью параметрами. Для наших целей целесообразно определить 2 параметра, характеризующих размер и форму (длины большой и малой осей), 2 параметра положения (координаты x и y центроида) и 1 параметр ориентации (поворот осей). Представляется удобным добавить шестой характеризующий параметр — плотность. Задав пятно его шестью моментами площади, можно решить задачу отыскания идеального эллипса, обладающего идентичными моментами. Решение подобной задачи называют восстановлением аппроксимирующего эллипса. Формулы, определяющие координаты центроида, приведены выше, другие же параметры определяются следующим образом:

$$A = \frac{4}{\pi} S_x^3 S_y \left(\sum x^2 - \left(\sum x\right)^2 / \sum 1\right);$$
$$B = \frac{4}{\pi} S_x S_y^3 \left(\sum y^2 - \left(\sum y\right)^2 / \sum 1\right);$$
$$C = \frac{4}{\pi} S_x^2 S_y^2 \left(\sum xy - \sum x \sum y / \sum 1\right);$$
$$E = \sqrt{(A - B)^2 + \frac{4}{\pi} C^2};$$
$$F = \sqrt[4]{AB - C^2}.$$

Длина большой оси $= \sqrt{(A + B + E)/(2F)}$.

Длина малой оси $= \sqrt{(A + B - E)/(2F)}$.

Угол поворота осей $= \frac{1}{2} \operatorname{arctg} 2C/(A - B)$.

$$\text{Плотность} = \frac{4}{\pi} \frac{S_x S_y \sum 1}{2F}.$$

Если изображение пятна содержит отверстия, их площадь не включается в общую площадь пятна. В случае, когда требуется найти моменты для фигуры с учетом вклада имеющихся отверстий, перед тем как производить вычисления по приведенным в данном подразделе формулам, следует вычислить соответствующие суммы ($\sum 1$, $\sum x$ и другие), сложив их значения для всех отверстий и для охватывающего пятна.

14.6.4. *Периметр пятна*

Периметр пятна представляет собой границу между элементами, образующими пятно и элементами фона. Если представить себе элементы образа как прямоугольные черные и белые плитки, покрывающие ровную плоскость, то граница будет соответствовать щелям между плитками различного цвета.

Периметр пятна есть суммарная длина его границ. Для того, чтобы определить периметр, необходимо подсчитать 3 суммы, а именно: найти число горизонтальных отрезков N_h, число вертикальных отрезков N_v и число углов периметра N_c и соответственно предусмотреть для них объем памяти в дескрипторе пятна. Кроме того, необходимо знать номер начальной строки каждого пятна или минимальное значение его координаты y. Это значение уже может быть известно, если до этого определялся охватывающий пятно прямоугольник.

При определении зарождения нового пятна параметр N_v устанавливается равным нулю, N_c — равным 2, а N_h — равным разности между номером конечного столбца и номером начального столбца. Минимальное значение координаты y устанавливается равным номеру текущей строки, если оно не было определено каким-либо образом ранее.

В процессе продлевания сравниваются значения минимальных координат по оси y, указанные в дескрипторах текущей и следующей границ. Дескриптор пятна с бо́льшим значением координаты обновляется, при этом к значению N_v этого пятна добавляется 1. Если номер начального столбца обрабатываемого отрезка отличается от номера столбца текущей границы, то к значению N_c следует прибавить 2, а к значению N_h — разность между номерами столбцов.

При завершении пятна к его параметру N_c добавляется 2, а к N_h — абсолютная величина разности между номерами столбцов последующей и текущей границ.

При проведении операции слияния сравнивают минимальные значения координат y завершающего и старого пятен, при этом дескриптор пятна с бо́льшим значением y обновляется. Аналогично к значению N_c добавляется 2, а к значению N_h — абсолютное значение разности между номерами столбцов последующей и текущей границ. Значения N_h, N_v и N_c нового пятна прибавляются к соответствующим значениям корректируемого пятна.

Периметр пятна является удобной характеристикой для распознавания формы. Однако, если периметр измеряется по длине горизонтальных и вертикальных границ, ре-

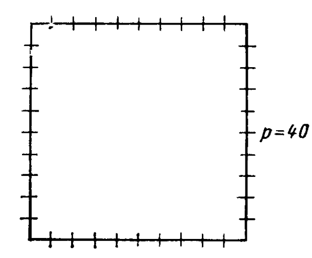


Рис. 14.8. Определение периметра квадрата. При стороне 10 элементов в прямоугольной ориентации периметр равен 40 элементам

зультаты измерений могут значительно отличаться от действительных. Рассмотрим для примера квадрат со стороной 10 элементов (рис. 14.8). Его периметр равен 40 элементам. Если квадрат повернуть на 45° (рис. 14.9), то длина его периметра становится равной 54 элементам.

Такая зависимость от ориентации может быть уменьшена с помощью так называемого срезания углов. Каждый раз, когда граница делает поворот на прямой угол, считается, что периметр несколько укоротился (рис. 14.10). С учетом сделанных поправок сумма горизонтальных, вертикальных и диагональных линий будет соответствовать действительной длине периметра. При этом, однако, длины линий, идущих под другими углами, будут определяться с погрешностями. Выяснено, что в наихудшем случае, когда линия идет под углом 26,5°, погрешность определения ее длины достигает 9,2 %. Длина окружности может быть измерена с погрешностью, определяемой множителем $(8/\pi)(\sqrt{2}(-1))$ и равной 5,48 %.

Если учесть все вышеперечисленные факторы (срезание углов, ожидаемую погрешность 5,48 %, различные масштабные коэф-

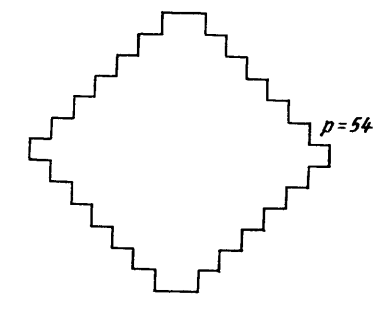


Рис. 14.9. Определение периметра квадрата. При диагональной ориентации периметр равен 54 элементам

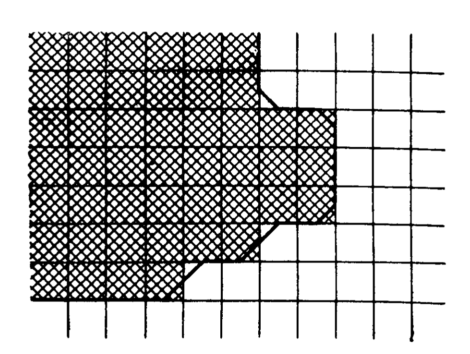


Рис. 14.10. Срезание углов для уменьшения погрешности от ориентации

фициенты по горизонтальной и вертикальной осям), формула для периметра принимает вид:

$$P = 0{,}948059\left(S_x N_h + S_y N_v - \frac{1}{2}\left(S_x + S_y - \sqrt{S_x^2 + S_y^2}\right) N_c\right).$$

14.6.5. *Списки элементов контуров*

Во многих случаях представляется целесообразным формировать списки элементов контуров, т. е. перечни координат всех точек, принадлежащих периметру пятна, в том порядке, как они встречаются при обходе контура. На основе таких списков можно получить множество параметров, используемых для описания формы объекта и удобных для отображения объектов на экране монитора, например, выделения каким-либо образом интересующего объекта. Списки элементов контура могут быть сформированы в процессе анализа изображения на связность, при этом полностью список контурных элементов конкретного пятна может быть составлен и в дальнейшем использован для обработки только после того, как анализ его на связность будет завершен.

В зависимости от применяемого языка программирования и располагаемого объема памяти формат списков может меняться. Достаточно легко сформировать список в виде односвязной последовательности блоков, каждый из которых содержит обе координаты и указатель на следующий блок в цепочке, однако этот метод налагает жесткие требования на систему управления памятью. Одним из вариантов распределения списков является формирование двухсвязных блоков, содержащих указатели на два соседних блока — пред-

шествующий и последующий. Схемы, использующие массивы памяти постоянной длины для запоминания множества элементов контура, требуют очень тщательного анализа во избежание непроизводительных затрат оперативной памяти. Ее объем должен быть рассчитан на размещение информации о контуре наибольшей ожидаемой длины, но, с другой стороны, большинство реальных контуров оказываются достаточно короткими.

В качестве точных целочисленных координат элемента образа обычно принято брать координаты его центра. Тогда отрезок контура, лежащего как бы в «щели» между элементами, будет иметь координаты, равные целому числу плюс 1/2. Принимая во внимание условность такого соотнесения, во всех обрабатывающих программах эту добавку можно просто опустить и в списках иметь дело только с целыми числами.

Для определенности принимаем, что обход контуров пятен осуществляется в таком направлении, что всегда единичный сигнал остается справа от контура, а нулевой — слева. Тогда пятна, состоящие из единиц, должны обходиться в направлении по часовой стрелке, а состоящие из нулей, — против часовой стрелки.

В принципе достаточно просто составить программу, которая могла бы сформировать список элементов периметра из общего массива двоично-квантованных элементов образа. Такой подход может оказаться полезным в совокупности с упрощенным вариантом алгоритма анализа на связность (см. разд. 14.5.4), который формирует массив идентификаторов пятен. Начиная с некоторой точки, принятой за начальную, программа обхода должна определять текущее местоположение и последующее направление контура. Определение направления и местоположения следующей точки контура может производиться на основе анализа ближайшей окрестности из 4×4 соседних элементов. Периметры, сформированные по данному методу, будут содержать $(N_v + N_h)$ записей, т. е. по одной записи на каждый из элементов, составляющих контур.

Составление списков элементов контура одновременно с анализом изображения на связность требует дополнительно двух полей с дескриптора контуров: одного бита на указание дальнейшего направления контура (вниз или вверх) и указателя начала или конца цепочки точек, составляющих данный контур, в зависимости от значения указателя направления. Дескриптор каждого пятна должен иметь указатель заголовка к списку элементов контура. Учитывая, что законченный список элементов составляет замкнутый контур, в качестве заголовка можно использовать любой из элементов контура.

Более эффективным методом хранения информации о контурах является запись только угловых элементов, т. е. только тех точек, где контур изменяет направление. Составленный список в этом случае будет иметь N_c записей. При этом обрабатывающие программы должны учитывать и все те точки, которые принадлежат контуру и располагаются между углами.

При определении зарождения пятна требуется предусмотреть необходимый объем памяти для хранения информации о номере текущей строки и о двух точках периметра в виде номеров столбцов начала и конца отрезка, обработанного кодированием длин серий. Соответственно в дескрипторе зарождающегося пятна необходим указатель на одну из этих точек, а в дескрипторе контура — указатели всех точек, составляющих контур. При операции продлевания в случае, когда номер начального столбца обрабатываемого отрезка отличается от номера столбца рассматриваемого контура, следует произвести две новые записи. Каждая из них будет содержать номер текущей строки, а также номера столбцов, взятые из текущего значения контура и новых значений обрабатываемого отрезка. Обе новых точки необходимо увязать в одну цепочку, относящуюся к данному контуру, с помощью указателя в дескрипторе текущего контура. При осуществлении операций завершения или слияния необходимо дополнительно создать две новые записи, содержащие информацию о номере текущей строки и номерах столбцов текущего и последующего контуров. Обе записи следует объединить в общую цепь, относящуюся к периметру пятна, с помощью соответствующих указателей дескрипторов контуров, и тогда обе цепочки могут быть объединены в одну общую цепь.

Списки элементов контуров могут быть использованы для целей отображения. С их помощью можно выделить наибольшее пятно или любое другое интересующее пятно на изображении, а также облегчить интерактивный режим работы двоичной СТЗ.

Списки элементов контуров можно использовать для получения признаков, по которым производится распознавание объектов. Одним из возможных классов таких признаков является радиус-вектор. Для каждой точки контура можно вычислить длину соответствующего радиуса-вектора, соединяющего эту точку с центроидом пятна или с некоторой точкой, выбранной по любому другому критерию. Полезными для целей распознавания признаками являются средняя, минимальная и максимальная

длины радиуса-вектора, а также стандартное отклонение длины вектора. Для определения ориентации фигуры можно использовать такой признак, как угол наклона максимального радиуса-вектора относительно какой-либо оси. Соотношение между длиной максимального и минимального радиусов используется иногда для различения детали и ее зеркального отображения. Количество локальных максимумов в функции длины радиуса-вектора от угла поворота соответствует числу углов в контуре фигуры.

В некоторых случаях список элементов контура аппроксимируется с помощью отрезков прямых линий. Любую часть многоугольного очертания фигуры можно заменить одной или несколькими прямыми линиями, в пределе заменяя весь списочный контур аппроксимирующей прямой линией. Если погрешность такой аппроксимации превышает заданное пороговое значение, то контур делится на части и каждая часть аппроксимируется с помощью аналогичной процедуры *. Деление на такие части должно осуществляться в точках экстремумов функции, например в точке, наиболее удаленной от первоначальной аппроксимирующей прямой линии.

Если прямые линии представлены хорошо известным уравнением $y = Mx + B$, то для вертикальных или близких к ним линий вычисление расстояний от них до произвольной точки весьма затруднено. Более удобным является представление в виде $Ax + By + C = 0$ с ограничивающим условием $A^2 + B^2 = 1$. Тогда расстояние от произвольной точки с координатами (x, y) до этой линии будет выражено в виде $Ax + By + C$.

Уравнение прямой линии можно легко получить, имея координаты двух любых точек, как правило, конечных точек отрезка. Более помехоустойчивым решением является результат применения метода наименьших квадратов, основанного на использовании собственных значений уравнения [8]. Решение по этому методу дано в приведенных ниже формулах. Для того, чтобы аппроксимировать последовательность точек с координатами x_i, y_i, вычисляются следующие параметры, а среднеквадратическое значение погрешности аппроксимации находится как λ/N:

$$N = \sum 1;$$

$$r = \sum x^2 - \left(\sum x\right)^2/N;$$

$$s = \sum xy - \sum x \sum y/N;$$

$$t = \sum y^2 - \left(\sum y\right)^2/N;$$

$$\lambda = \frac{1}{2}\left(r + t - \sqrt{(r-t)^2 + 4s^2}\right;$$

$$a = \begin{cases} -s & \text{при } r > t; \\ t - \lambda & \text{при } r \leqslant t; \end{cases}$$

$$b = \begin{cases} r - \lambda & \text{при } r > t; \\ -s & \text{при } r \leqslant t; \end{cases}$$

$$A = a/\sqrt{a^2 + b^2};$$

$$B = b/\sqrt{a^2 + b^2};$$

$$C = \frac{-A\sum x - B\sum y}{n}.$$

14.7. Растяжение, сжатие и построение остова

Растяжение, сжатие и построение остова составляют класс преобразований, трансформирующих двоичные образы. В связи с этим можно ввести понятия входного образа и выходного образа, который может быть получен из входного с помощью какого-либо из этих преобразований или их комбинаций. Для того, чтобы извлечь из полученного таким путем выходного образа некую значимую информацию, необходим его дальнейший анализ. Операции растяжения и сжатия достаточно просто реализуются аппаратными средствами. Наилучшим способом их описания могут служить массивы двоично-квантованных элементов, однако для ускорения вычислений их легко адаптировать для представления методом кодирования длин серий.

Преобразования растяжения и сжатия вызывают соответствующие увеличения или уменьшения размеров, имеющихся в образе пятен. По существу, они являются взаимно зависимыми операциями в том смысле, что увеличение числа единиц в образе однозначно эквивалентному уменьшению числа нулей. Однако это не означает, что последовательное применение растяжения и сжатия приведет к восстановлению исходного образа. Более того, поочередное повторение операций незначительного и одинакового растяжения и сжатия образов оказывается эффективным при сглаживании, устранении

---

* Такая процедура является рекурсивной. Если же используемый язык программирования не допускает рекурсивного вызова подпрограмм линейной аппроксимации, то можно использовать массивы дескрипторов, в которых содержатся части общей кривой контура. Тогда одна и та же программа обработки будет поочередно обрабатывать эти массивы и по частям аппроксимировать контур.

шумов и обнаружении пятен с неточно известными размерами. Таким методом можно устранять и некоторые погрешности в изображении. Локализация погрешностей с помощью сглаживания осуществляется путем сравнения исходного и сглаженного образов. Указанные способы применяются для проверки печатных плат и контроля микроэлектронных компонентов [9]. Методика масштабирования может успешно применяться для создания «зон нечувствительности» при непосредственном сравнении образов.

Как отмечалось выше, увеличение числа единиц в образе соответствует пропорциональному уменьшению числа нулей. Допустим, требуется произвести растяжение (увеличение числа единиц) в некотором входном образе p_{yx}, в результате которого получаем выходной образ q_{yx}. Некоторому элементу q_{yx} приписывают значение «1» тогда, когда равно «1» либо значение соответствующего элемента p_{yx} входного образа, либо значение одного из элементов в его окрестности. В противном случае элементу q_{yx} выходного образа приписывают значение «0». Наоборот, при сжатии единичного образа элементу q_{yx} приписывают значение «0», если равен «0» элемент p_{yx} или любой из элементов его окрестности. При невыполнении этих условий элементу q_{yx} приписывают значение «1». Эти преобразования могут быть повторены произвольное число раз для того, чтобы соответственно растянуть или сжать образ. Скорость преобразований растяжения или сжатия зависит от размеров «окрестности» рассматриваемого элемента: она ниже, если в «окрестность» включены 4 элемента (см. рис. 14.4), и выше, если «окрестностью» считаются 8 элементов (см. рис. 14.5). Небольшие области стремятся растянуться в виде ромба при 4-связной окрестности или в виде квадрата при 8-связной окрестности.

Построение остова во многом схоже с операцией сжатия, однако в отличие от нее гарантирует, что сжимаемое пятно в конечном счете не исчезнет полностью. Когда производится построение остова длинных и узких пятен, то результатом операции является средняя линия, которая используется в качестве представления исходного пятна. В этом случае после каждого шага операции сжатия производится проверка: если элемент $p_{yx} = 1$, а $q_{yx} = 0$ и при этом все элементы в окрестности q_{yx} равны 0, то значение q_{yx} заменяется на 1.

Двухпроходный алгоритм [7] работает быстрее, чем многократное сжатие, но требует массива памяти для хранения данных о расстояниях до единиц и нулей в первоначальном массиве двоичных элементов. При прямом проходе вычисляются кратчайшие расстояния от каждого элемента

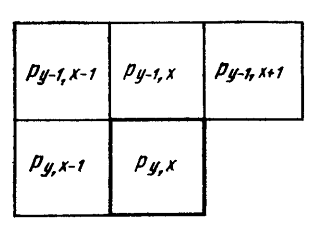


Рис. 14.11. Окрестность анализа при прямом проходе для двухпроходного алгоритма построения остова

до ближайшего контура, расположенного слева и сверху от элемента. Во время второго, обратного, прохода рассчитываются расстояния в направлении направо и вниз.

При первом проходе элементы обходятся в обычном растровом порядке, т. е. строки отсчитываются сверху вниз, а элементы в каждой строке — слева направо. При рассмотрении элемента p_{yx} во внимание принимаются 4 соседних элемента, расположенных сверху и слева от рассматривае-

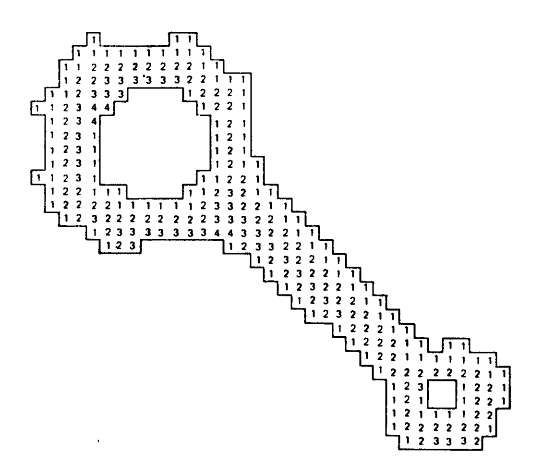


Рис. 14.12. Результат прямого прохода алгоритма построения остова

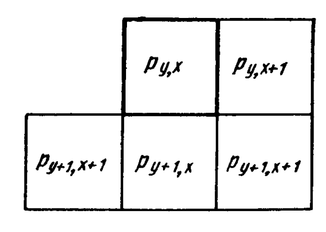


Рис. 14.13. Окрестность анализа при обратном проходе для двухпроходного алгоритма построения остова

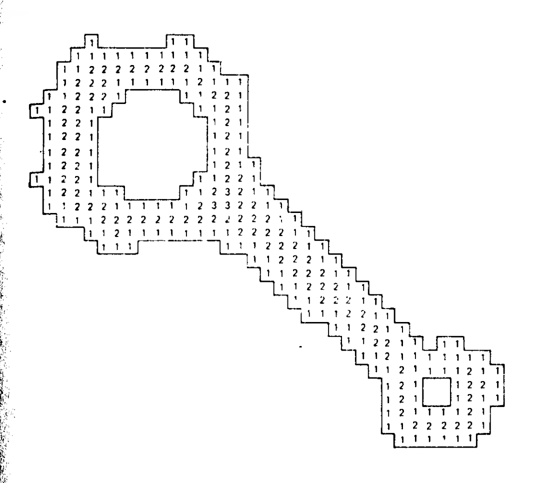


Рис. 14.14. Результат обратного прохода алгоритма построения остова

мого (рис. 14.11), т. е. именно те, которые уже были пройдены при прямом проходе. Если элемент p_{yx} не равен нулю, его значение устанавливается равным единице плюс наименьшее из значений элементов $p_{y-1,\,x-1}$, $p_{y-1,\,x}$, $p_{y-1,\,x+1}$ и $p_{y,\,x-1}$. На рис. 14.12 представлены результаты обработки некоторой части образа после первого прохода. Второй проход производится в обратном порядке: строки отсчитываются снизу вверх, а элементы в каждой строке — справа налево. В этом случае также анализируются 5 элементов (рис. 14.13). Если элемент p_{yx} не равен нулю, то его значение выбирают наименьшим из этих пяти элементов, т. е. среди рассматриваемого и

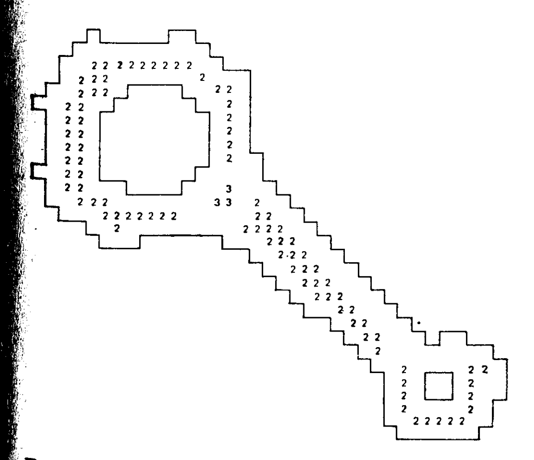


Рис. 14.15. Отображение полученного «остова» шатуна

элементов $p_{y+1,\,x+1}$, $p_{y+1,\,x}$, $p_{y+1,\,x-1}$ или $p_{y,\,x+1}$. На рис. 14.14 представлены результаты обработки образа после второго прохода. После того как вычислен весь массив расстояний, формируется остов, представляющий собой набор элементов из массива расстояний, которые не имеют соседей с большими значениями. Эти элементы представлены на рис. 14.15.

14.8. Преобразования полутоновых образов

Использование при обработке изображений в робототехнике полутоновой информации представляет широкие возможности для создания более универсальных и гибких систем, чем позволяют двоичные образы. На обозреваемые сцены накладываются меньшие ограничения, в частности уменьшаются требования к освещению (но, к сожалению, пока еще не позволяют обойтись вовсе без него). Меньше сложностей возникает при обработке изображений перекрывающихся деталей. Однако достигается это за счет ужесточения требований к обработке. Общее количество обрабатываемых данных возрастает, а их обработка становится более сложной и длительной. Характерной чертой используемых разнообразных методов обработки является то, что они часто приводят к неоднозначным результатам, что предъявляет жесткие требования к пороговым системам принятия решения, устройство которых определяется областью применения. Фундаментальные исследования природы зрения человека и машинного зрения привели к созданию многих сложных и совершенных алгоритмов обработки образов, однако сегодня многие из них либо не обладают требуемой помехоустойчивостью, либо не достаточно эффективны с вычислительной точки зрения для непосредственного использования в производственной практике.

14.8.1. Пороговая обработка

Методы обработки двоичных образов могут применяться к полутоновым образам только в том случае, когда имеется способ приведения значений всех их элементов к двоичным. Принципиальным отличием такой методики от обычной обработки двоичных образов является возможность изменять уровень порогового отсечения в зависимости от особенностей изображения, а не устанавливать его значение априорно. Некоторые из рассмотренных ниже алгоритмов могут быть реализованы аппаратными средствами без использования буферной памяти на полный кадр полутонового изображения. Методика двоичной обработ-

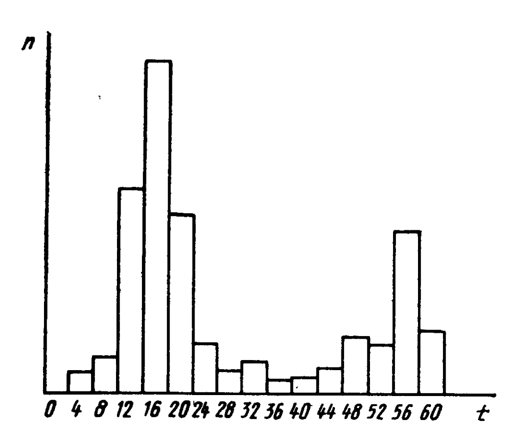


Рис. 14.16. Бимодальная гистограмма уровней яркости образа:
t — уровень яркости; n — количество элементов с данной яркостью

ки с переменным уровнем порогового отсечения занимает промежуточное место между обработкой двоичных и полутоновых образов.

Гистограмма образа представляет собой зависимость $n(t)$ числа элементов n от значения уровня яркости t. Обычно она изображается в виде совокупности полос (рис. 14.16). По оси абсцисс откладываются значения уровней яркости от нулевого до максимального, а высота каждой отдельной полосы соответствует общему числу элементов с данной яркостью.

Если плотность распределения яркости является бимодальной, то для обработки такого образа можно использовать некоторые эффективные алгоритмы. Такое распределение возникает, например, когда фон на изображении равномерный и имеет один цвет, а расположенный на этом фоне объект другого цвета и также имеет равномерное распределение яркостей. Гистограмма такого образа будет иметь 2 пика, соответствующих имеющимся цветам объекта и фона. Для того, чтобы выделить объект на таком фоне, уровень порогового отсечения следует установить между двумя пиками. На гистограмме (см. рис. 14.16) это будет соответствовать яркости примерно 36—40 единиц. Установка порога именно в этом месте оптимальна не только в терминах статистической теории принятия решений: в этой области алгоритм обработки наименее чувствителен к изменению освещенности сцены и точности установки уровня порогового отсечения.

Чаще всего сформированные по результатам анализа реальных полутоновых образов гистограммы оказываются не гладкими, а изрезанными. Это объясняется тем, что случайные изменения яркости приводят к появлению множества локальных максимумов и минимумов. Поэтому для отыскания глобальных пиков или впадин необходима одновременная обработка всего диапазона изменений яркости. Эффективным способом отыскания максимумов или минимумов в гистограмме является нахождение максимального из соответствующих чисел n по некоторому диапазону $\pm k$ соседних уровней яркости t, где k должно быть равно примерно половине ожидаемого расстояния между пиками или впадинами гистограммы (для примера рис. 14.16 значение k примерно равно 15).

Небольшие изменения в значениях уровня порогового отсечения могут вызвать кажущиеся изменения размеров объектов двоичного образа в сторону увеличения или уменьшения. Если же ожидаемые размеры объекта априорно известны, эта информация может быть использована для точной подстройки уровня путем повторяющегося анализа образа при различных значениях уровня порогового отсечения до тех пор, пока размеры объекта, полученные по результатам анализа, не будут равны априорно известным.

Если уровень порогового отсечения выбран неточно, то полученный в результате квантования двоичный образ объекта может оказаться несвязным, раздробленным. В связи с этим в качестве достаточно чувствительного индикатора корректности выбранного значения уровня может служить общее число пятен, полученное алгоритмом анализа связности, или же суммарный периметр всех пятен в изображении. Поиск оптимального уровня порогового отсечения осуществляется повторной обработкой одного и того же образа при различных уровнях.

При неравномерно освещенной сцене используется переменный уровень порогового отсечения. Его значения вычисляются как некоторая алгебраическая функция координат x и y или заранее записываются в некоторый буфер, а затем вычитаются из текущего сигнала. В общем случае значение уровня может состоять из двух компонент: постоянной и пространственно зависимой.

14.8.2. Выделение границ

Выделение границ используется для локализации отдельных областей образа. Если предположить, что образы состоят из наборов участков с примерно одинаковой яркостью, то границу можно определить как некоторую линию, разделяющую эти участки. На практике большинство образов имеет более сложную структуру, однако понятие границы может оказаться полезным.

Выделение границ состоит из двух этапов: предварительная локализация элементов образа, предположительно принадлежащих границе, и объединение выявленных кандидатов в одну связную линию. Первый этап реализуется достаточно просто, а для реализации второго могут потребоваться некоторые ухищрения.

Элементы — кандидаты на принадлежность границе отыскиваются в местах перепадов яркости. Как правило, их определяют методом оценки градиента, т. е. двухмерной пространственной производной по яркости. Градиент можно разложить на составляющие по координатам x и y или же на величину и направление. На практике удобнее непосредственно оценивать производные по двум ортогональным осям, а затем пересчитывать в величину и направление. Пространственные производные обычно вычисляются в некотором окне, состоящем из нескольких элементов. Чем больше размер окна, тем ниже чувствительность к шумам и меньше погрешность дискретизации. Однако большие размеры окна требуют большего времени на вычисления и аппаратных средств для хранения промежуточных данных. Кроме того, большие размеры окна приводят к «размыванию» границы на несколько элементов.

Наиболее известным методом оценки градиента является метод Робертса [10], основанный на анализе в окне размером 2×2 элемента. Две ортогональные производные берутся по диагоналям окна (рис. 14.17): $(p_{y+1,\,x} - p_{y,\,x+1})$ и $(p_{y+1,\,x+1} - p_{y,\,x})$. Величина градиента представляет собой корень квадратный из суммы квадратов компонент, однако с вычислительной точки зрения удобнее просто складывать их абсолютные значения. Направление градиента может быть грубо оценено четырьмя направлениями, в зависимости от соотношения величин и знаков двух составляющих производной.

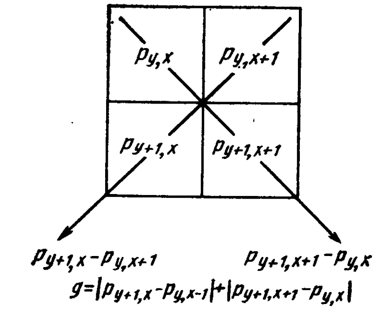
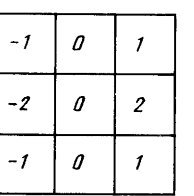


Рис. 14.17. К определению градиента по методу Робертса



-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

Градиент в горизонтальном направлении

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

Градиент в вертикальном направлении

Величина градиента $=\sqrt{h^2+v^2}$, направление градиента $=\operatorname{arctg} v/h$

$h=(p_{y-1,x-1}+2p_{y,x+1}+p_{y+1,x+1})-(p_{y-1,x-1}+2p_{y,x-1}+p_{y+1,x-1})$

$v=(p_{y+1,x-1}+2p_{y+1,x}+p_{y+1,x+1})-(p_{y-1,x-1}+2p_{y-1,x}+p_{y-1,x+1})$

Рис. 14.18. К определению градиента по методу Собеля

Использование окна размером 3×3 элемента дает более точные результаты. Значения весовых коэффициентов, используемые обычно при вычислении составляющих производной в таком окне, приведены на рис. 14.18. Возможны также и другие конфигурации окна:

$$d_x = (p_{y-1,\,x+1} + 2p_{y,\,x+1} + p_{y+1,\,x+1}) - (p_{y-1,\,x-1} + 2p_{y,\,x-1} + p_{y+1,\,x-1}),$$

$$d_y = (p_{y+1,\,x-1} + 2p_{y+1,\,x} + p_{y+1,\,x+1}) - (p_{y-1,\,x-1} + 2p_{y-1,\,x} + p_{y-1,\,x+1}).$$

Указанный метод носит название метода градиента Собеля [11]. Так же как и в методе Робертса, величина градиента вычисляется как $\sqrt{d_x^2 + d_y^2}$ или же приближенно как $|d_x| + |d_y|$. Направление градиента вычисляется по формуле $\operatorname{arctg}(d_y/d_x)$.

Вычисление градиентов по приведенным формулам легко реализуется с помощью быстродействующих аппаратных средств. Результатом вычислений является градиентный образ значений (а если необходимо, то и направлений). Заключительной операцией для выделения элементов, принадлежащих границе, является сравнение с порогом. Значение порога должно быть с одной стороны достаточно низким, чтобы не пропустить реальную границу, а с другой стороны, — достаточно высоким, чтобы не зашумлять образ ложными границами. Как правило, такое идеальное значение порога установить не представляется возможным, поэтому для выделения полезных сигналов на фоне шумов применяются более сложные алгоритмы, которые соединяют после-

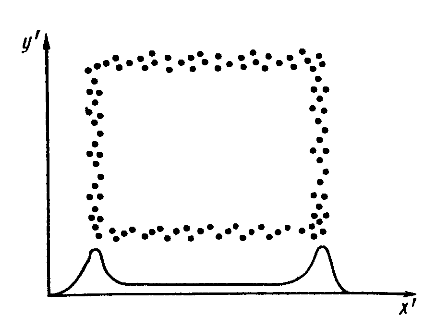


Рис. 14.19. Определение направления границы по гистограмме направлений градиента

довательности смежных точек — кандидатов в границы.

Одним из таких алгоритмов является выбор некоторой пробной точки с высоким значением градиента, использование направления градиента для поиска соседней точки, включаемой в границу, и последовательное повторение указанных процедур. Такой упрощенный алгоритм эффективен лишь в простейших случаях. В более сложных ситуациях предпочтительнее использовать алгоритмы, основанные на теории графов [12]. Однако для их выполнения требуется большая вычислительная мощность.

Эффективность алгоритмов можно существенно повысить, если меняются какие-либо априорные сведения о характере отыскиваемых границ. Например, несколько эффективных методов используются для нахождения прямых линий.

Для прямой линии (или для группы прямых линий) направления градиентов одинаковы во всех точках. Построив гистограмму направлений градиентов всех пробных точек, можно определить точное направление границы. Для этого все пробные точки проектируются на некоторую ось, построенную в трансформированной системе координат перпендикулярно к направлению границы (рис. 14.19). Пики гистограммы спроектированных точек укажут местоположение границы.

Более чувствительный метод, не зависящий от точности оценки направления градиента, основан на так называемом преобразовании Хафа [5]. Если прямая линия представлена уравнением вида

$$x \sin\theta + y\cos\theta - \rho = 0,$$

то все линии, проходящие через точки x_i, y_i, могут быть представлены парами коэффициентов (θ, ρ), которые удовлетворяют следующему уравнению:

$$\rho = x_i \sin\theta + y_i \cos\theta.$$

Эти два уравнения представляют собой преобразование координат точек, заданных в координатной системе $x - y$, в кривую, заданную в системе $\theta - \rho$. Две различных точки будут преобразованы в две кривые, а точка пересечения этих кривых будет представлять прямую линию, проходящую через заданные точки. Если на прямой линии, заданной в системе координат $x - y$, лежит n точек, то в системе $\theta - \rho$ n кривых пересекутся в одной точке, соответствующей исходной прямой линии.

Для того, чтобы найти прямолинейные границы, проходящие через множество полученных пороговой обработкой градиентных точек, формируется двумерный массив. Одно измерение в массиве, соответствующем образу, формируется путем приращения значений ρ от 0 до максимального значения радиуса. Другое измерение представляет собой равные приращения θ в диапазоне от 0 до 2π. Первоначальные значения элементов массива устанавливаются равными нулю. Для каждой градиентной точки вычисляется функция $\rho(\theta)$ при каждом дискретном значении θ и в соответствующий элемент массива добавляется 1. Если направление градиента в точке известно, то значения θ не вычисляются, а устанавливаются сразу, но с некоторым допуском на погрешность. После окончания вычислений элементам массива, в которых записаны достаточно большие числа, соответствуют группы точек с коллинеарными градиентами.

Резервируемый массив должен содержать лишь такое количество элементов, которое достаточно для хранения информации о возможных направлениях прямых линий в образе, которые и образуют отдельные элементы массива. После того как с помощью описанной методики были установлены точки, принадлежащие одной прямой, для уточнения коэффициентов уравнения этой прямой можно использовать соотношения, приведенные в конце разд. 14.6.

Методика преобразований Хафа может быть обобщена на случай локализации любой кривой, которую можно задать двумя коэффициентами. Теоретически для определения более чем двух коэффициентов требуются массивы более высокой размерности, но их практическая реализация затруднена. Примером кривой, задаваемой двумя коэффициентами, является окружность радиуса R с координатами центра (x_c, y_c), которая задается уравнением вида:

$$\frac{(x - x_c)^2}{R^2} + \frac{(y - y_c)^2}{R^2} = 1.$$

Если априорно известен радиус R, а x и y являются координатами точки, через которую должна пройти окружность, то данное уравнение преобразует точку с координатами в системе (x, y) в окружность с координатами центра (x_c, y_c). Дальнейшая часть анализа аналогична рассмотренному случаю для прямых линий.

14.9. Распознавание образов

В предыдущих разделах рассмотрены способы извлечения из образов простейшей информации. Для ограниченного класса областей применения обработки изображений такой информации может быть достаточно. Примерами могут служить контроль наличия или отсутствия объекта, измерение площади, определение параметров положения объекта. Во всех этих случаях точно известно, что именно присутствует в наблюдаемой сцене.

СТЗ способны функционировать и в среде с меньшими ограничениями, если выработана определенная стратегия интерпретации того, что видит система. К задачам, требующим такого режима, относятся обнаружение объектов в произвольном положении и ориентации, разделение множественных объектов (в том числе перекрывающихся).

Для распознавания конкретного заданного объекта можно придумать множество специфических способов. Но целесообразнее пользоваться универсальными методами, применимыми к широкому классу объектов. Одним из таких методов является обучение показом, при котором распознающая система получает знания об объектах по их реальным образцам. Такие методы предполагают соответствующую структуру данных, в которой предусмотрены представления эталонов (или прототипов) и процедура согласования, с помощью которой осуществляется сравнение хранящегося в памяти эталона и анализируемого объекта.

14.9.1. *Классификация на основе значений признаков*

Наиболее простые методы распознавания основаны на использовании численных значений признаков (например, таких, как площадь и периметр пятна), инвариантных относительно параметров положения объекта. Площадь и периметр неизвестного объекта сравниваются с соответствующими параметрами нескольких эталонов и выбирается тот эталон, отклонение от которого оказалось наименьшим. Понятие наименьшего отклонения можно проиллюстрировать условным размещением распознаваемого объекта и всех эталонов в виде точек в некотором пространстве, координатами в котором являются периметр и площадь. Используя так называемое правило ближайшего соседа, выбирают в этом пространстве тот эталон, который ближе других находится к объекту. Размерность пространства равна числу рассматриваемых признаков.

Пусть имеется m эталонов и для каждого из них измерено n признаков f_{ij}; $i = 1, \ldots, m$; $j = 1, \ldots, n$. Предположим также, что распознаваемый объект имеет признаки f_j; $j = 1, \ldots, n$. Тогда ненормированное расстояние в пространстве признаков от объекта до эталона i будет определяться следующей формулой:

$$D_i = \sum_{j=1}^{n} (f_j - f_{ij})^2.$$

При этом ближайшим соседом будет эталон i, для которого D_i минимально.

Приведенная формула применима в том случае, когда все измеряемые признаки имеют сравнимые диапазоны значений. Если же признаки существенно различны, как, например, число отверстий и их площадь, выраженная числом элементов образа, тогда разница в больших параметрах признаков поглотит разницу в малых параметрах. Во избежание этого вводят нормирующие множители. Тогда в приведенном примере необходимо n нормирующих множителей N_j; $j = 1, \ldots, n$, т. е. по одному на каждый признак. В этом случае нормированное расстояние в пространстве признаков определится как

$$D_i = \sum_{j=1}^{n} \left(\frac{f_i - f_{ij}}{N_j} \right)^2. \qquad (14.1)$$

Коэффициенты N_j определяются исходя из ожидаемого диапазона изменения значений признаков у каждого эталона, т. е. учитывают возможные значения признаков, которые могут появиться при большом количестве измерений. Если отсутствуют какие-либо иные данные, то в качестве нормирующего коэффициента можно взять «типичное» значение параметра признака.

Диапазон изменения значений признаков может быть определен в процессе обучения. Предположим, имеется p_i экземпляров эталона i, на которых осуществлялось обучение. В результате измерений получен ряд данных о параметрах признаков f_{ijk}, $j = 1, \ldots, n$; $k = 1, \ldots, p_i$. Тогда среднее значение признаков f_{ij} может быть вычислено по формуле

$$f_{ij} = \frac{1}{p_i} \sum_{k=1}^{p_i} f_{ijk}.$$

Традиционно оценка дисперсии выражается следующей формулой:

$$v_{ij} = \frac{1}{p_i - 1}\sum_{k=1}^{p_i}(f_{ijk} - f_{ij})^2 = $$

$$= \frac{1}{p_i - 1}\left(\sum_{k=1}^{p_i} f_{ijk}^2 - p_i f_{ij}^2\right). \quad (14.2)$$

Однако в рассматриваемом случае предпочтительнее выражение:

$$v_{ij} = \frac{1}{p_i}\left[v_{0ij} + \sum_{k=1}^{p_i}(f_{ijk} - f_{ij})^2\right] = $$

$$= \frac{1}{p_i}\left(v_{0ij} + \sum_{k=1}^{p_i} f_{ijk}^2 - p_i f_{ij}^2\right), \quad (14.3)$$

в котором используется априорная оценка дисперсии v_{0ij}. Форма записи (14.3) позволяет избежать деления на 0, если число используемых эталонов равно 1. Кроме того, она облегчает задачу, когда число экземпляров мало, а значительная недооценка дисперсии, даваемая формулой (14.2) и приводящая к занижению значений соответствующих признаков, может вызвать назначение неоправданно завышенной нижней границы диапазона допустимых значений признака. В отсутствие более точных данных приемлемым значением априорной оценки дисперсии может служить квадрат одного процента от «типового» значения признака.

Нормирующие коэффициенты N_j, используемые в уравнении (14.1), определяются как взвешенные средние дисперсий измерений:

$$N_j = \sum_{i=1}^{m} p_i v_{ij} \Big/ \sum_{i=1}^{m} p_i.$$

Если можно предположить, что разные эталоны дадут разные значения дисперсий, тогда можно пойти на шаг дальше и использовать эти частные значения дисперсий в качестве индивидуальных нормирующих коэффициентов для каждого эталона и каждого признака.

Если распознающей СТЗ будет предъявлен объект, не имеющий прототипа в заданном наборе эталонов, следует ожидать, что в пространстве признаков нормированные расстояния от него до всех имеющихся эталонов будут достаточно большими. В этом случае система должна идентифицировать его как не принадлежащий заданному набору. Какое же приемлемое значение порога D_i следует выбрать в качестве критерия для обоснованного отклонения гипотезы о наличии объекта?

В любой системе, использующей пороговые решения, могут возникать два типа ошибок: ошибка пропуска объекта, которая возникает, если ошибочно отклонить гипотезу о наличии объекта, который на самом деле принадлежат заданному набору, и ошибка ложной тревоги, возникающая, если ошибочно отождествить с заданным посторонний объект. Если завысить пороговое значение расстояния D_i, то вероятность пропусков уменьшится, но возрастет вероятность ложной тревоги, и, наоборот, если усилить критерий для лучшего устранения посторонних объектов, число пропусков может оказаться значительным.

В статистической теории решений утверждается, что при идеальных условиях плотность распределения значений D_i, полученная расчетами по нескольким экземплярам одного и того же эталона, подчиняется закону хи-квадрат (χ^2) [13]. Эта математическая функция зависит от числа признаков, использовавшихся для определения расстояний.

В табл. 14.1 приведены наиболее употребительные значения величин χ^2/n. Таблица дает возможность определить те значения порогов, при которых значения отношения D_i/n находятся ниже соответствующего уровня в 95 % или 99 % случаев. Например, если при распознавании эталона с номером i используются 4 признака, то в 95 % случаев величина $D_i/4$ будет находиться ниже значения 2,37 (т. е. D_i будет меньше или равно 9,48), а в 99 % случаев она будет находиться ниже значения 3,32 (т. е. D_i будет ниже или равно 13,28).

По табл. 14.1 можно определить те значения порога, которые приблизительно обеспечивают заданные вероятности пропусков (эти вероятности могут быть определены

14.1. Значения параметра χ^2/n

n	Значения параметра χ^2/n при доверительной вероятности 95 %	Значения параметра χ^2/n при доверительной вероятности 99 %
1	3,84	6,64
2	3,00	4,61
3	2,61	3,87
4	2,37	3,32
5	2,21	3,02
10	1,83	2,32
15	1,67	2,04
20	1,57	1,88
30	1,46	1,70

только приблизительно, поскольку многие из идеальных условий, требующихся для точного вычисления значений χ^2, на практике не соблюдаются). Вероятность ложной тревоги определить сложнее: она зависит от степени сходства посторонних объектов с объектами из набора эталонов, а также от частоты появления этих объектов. Наилучшей с практической точки зрения стратегией является выбор соответствующего величине D_i/n значения порога с последующей проверкой его адекватности. Возникающие в процессе работы ошибки могут быть использованы для более точной установки порога.

Составление конкретного перечня признаков для распознавания представляет сложную задачу. Существуют сотни потенциально полезных характеристик пятна или всего образа. В качестве примера полезно рассмотреть один из конкретных наборов таких характеристик. Разработанная в 1974 г. версия зрительного модуля СТЗ Стэнфордского исследовательского института [1] использовала 7 следующих признаков:

периметр;
площадь;
общая площадь всех отверстий;
длина минимального радиуса-вектора;
длина максимального радиуса-вектора;
среднеквадратическое значение длины среднего радиуса-вектора;
компактность (отношение периметра к площади [2]).

Использование этих признаков показало их высокую эффективность на множестве объектов различной формы, однако оптимальность их состава при этом не определялась.

Для того, чтобы оценить адекватность заданного набора признаков, можно рассмотреть по очереди каждый эталон как неизвестный объект и попытаться сопоставить его с остальными $(n-1)$ эталонами. Минимальное значение D_i/n должно быть значительно выше порога отклонения гипотезы. Если это не так, то вероятность того, что неизвестный объект может быть идентифицирован с двумя различными эталонами, окажется достаточно высокой. Для предотвращения такой ситуации в общий набор следует добавить дополнительные признаки.

14.9.2. Распознавание на основе соответствий

При реализации алгоритма ближайшего соседа и аналогичных методов сравнения предполагается, что значения глобальных признаков характеризуют весь объект в целом. Однако на практике не всегда объект находится полностью в поле зрения СТЗ или же он может перекрываться другими объектами. Поэтому нельзя гарантировать, что применяемые алгоритмы обработки зрительной информации всегда будут давать законченные и правильные результаты. В данном подразделе рассматриваются методы обработки, способные функционировать в условиях неточной или неполной информации. Теоретически они не так детально разработаны и не столь тщательно испытаны на практике. Представляется, что вполне удовлетворительные результаты они могут дать только в ограниченном классе задач, но создание универсальных СТЗ, использующих эти методы, — дело будущего.

Методы, использующие соответствия, основаны на так называемых локальных признаках, т. е. на таких небольших частях сцены, которые чем-либо характерны. Для нахождения локальных признаков имеется большое разнообразие способов (см. например, приведенный ниже список). Эталонная модель представляет собой список определений локальных признаков и их пространственных соотношений, которые предстоит обнаружить в процессе анализа исследуемого объекта. Распознавание и последующая оценка местоположения (т. е. определение положения и ориентации объекта) предполагают поиск некоторого набора или группы локальных признаков, которые соответствуют набору определений эталона. Процедура нахождения соответствий учитывает только те части образа, которые действительно соответствуют определениям эталонной модели, так что отсутствие каких-либо данных или наличие мешающей информации может быть легко учтено (конечно, при условии, что имеется достаточное количество достоверной информации). После того как произведена пробная идентификация с целью повышения достоверности, можно провести проверку оставшейся информации, не участвовавшей в анализе.

Ниже приведен не претендующий на полноту список особенностей объектов, которые могут использоваться в качестве локальных признаков.

Небольшие пятна в двоичных образах. Они особенно полезны, когда СТЗ имеет дело с деталями, в которых просверлено или проштамповано множество отверстий.

Периметр пятна, который после аппроксимации линейными отрезками может быть использован для сопоставления как самих отрезков, так и углов.

Границы в полутоновых образах.

Конфигурации, выделяемые корреляционно-поисковыми методами.

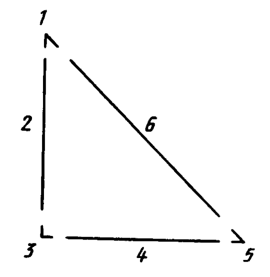
Некоторые особые параметры, рассмотренные в специальной литературе, такие, на-

пример, как оператор важности [14] или гистограмма направлений градиента при ограничениях на размеры пятна [15].

Локальные признаки всегда могут быть охарактеризованы их положением, например, в виде координат по осям x и y. Кроме того, их могут характеризовать и некоторые другие параметры (такие, как размеры или ориентация).

Для решения частных задач используется множество специальных методов. Например, можно обнаружить один или несколько ключевых признаков, являющихся уникальными для данного образа, а следовательно, отличительными. После этого следует провести поиск других локальных признаков, которые находятся в ожидаемом соотношении с ключевым признаком. В этом смысле полезным параметром является расстояние между двумя признаками. Однако распространение этих методов ограничивает необходимость составления специальных программ. Приходится индивидуально разрабатывать программы для каждой новой детали. При этом сложность программ многократно увеличивается, как только в рассмотрение вводится несколько локальных признаков. Рассматриваемый ниже метод является достаточно общим. В нем эталонные модели формируются в процессе обучения показом.

Методы распознавания, основанные на определении соответствий, предполагают, что описания эталонов для каждой обрабатываемой детали включают не только ами локальные признаки (отыскиваемые в нализируемом образе детали), но и пространственные соотношения между этими признаками. Для примера рассмотрим прямоугольный треугольник (рис. 14.20). Предположим, что в качестве локальных признаков СТЗ использует отрезки прямых раниц и углы. Следовательно, эталонная модель треугольника состоит из трех ре-ер *2*, *4* и *6*, для которых определены длина и ориентация, и трех углов *1*, *3* и *5*,



ис. 14.20. К методу максимальной клики. талонная фигура, признаками являются ороны и углы.

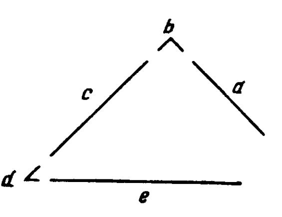


Рис. 14.21. К методу максимальной клики. Анализируемый треугольник, искаженный помехами

заданных их значениями. Кроме того, имеется дополнительная информация о соотношениях, например, о прилегании сторон к углам: к углу *1* прилегают стороны *2* и *6*, сторона *6* прилегает к углам *1* и *5* и т. п.

Предположим теперь, что в поле зрения камеры попало изображение, из которого были выделены локальные признаки (рис. 14.21). Это тот же прямоугольный треугольник, но повернутый так, что его гипотенуза расположена горизонтально. Из-за плохих условий освещения один угол и часть сторон не были воспроизведены. Процедура анализа соответствий будет сопоставлять отдельные части исследуемого объекта с соответствующими описаниями эталона.

Введем понятие соответствия для обозначения сопоставления признака объекта с признаком эталона. В нашем примере можно выявить соответствие $c-4$, поскольку сторона c на образе объекта и сторона *4* эталона имеют одинаковую длину. Можно также выделить соответствие $c-2$, но не $6-c$, поскольку сторона c образа объекта и сторона *6* эталона имеют разную длину. На рис. 14.22 приведен граф всех возможных соответствий сторон и углов образа объекта (см. рис. 14.21) и их аналогов для эталона (см. рис. 14.22). Некоторые дополнительные соответствия (такие, как $b-1$ и $b-5$) стали возможны вследствие нежестких допусков на погрешности измерений и влияния шумов.

Далее следует установить совместимость выявленных соответствий. Два соответствия несовместимы, если выполняется одно из следующих утверждений:

имеется противоречие. Соответствия $b-1$ и $b-3$ несовместимы, поскольку од-

$b-1$	$c-2$	$d-5$
$b-3$	$c=4$	$e-6$
$b-5$	$d-1$	

Рис. 14.22. К методу максимальной клики. Начальные соответствия признаков анализируемого образа и эталона

Рис. 14.23. К методу максимальной клики. Пример графа совместимых соответствий

ному углу на объекте поставлены в соответствие 2 угла эталона;

не выполняются условия прилегания. Угол *5* и сторона *2* не являются прилегающими в эталоне, в то же время угол b и сторона c на объекте прилегают друг к другу. Следовательно, соответствия $b-5$ и $c-2$ несовместимы;

не совпадают расстояния между признаками. Расстояние между углами *1* и *5* на эталоне гораздо больше расстояния между углами b и d объекта, поэтому соответствия $b-5$ и $d-1$ несовместимы.

На рис. 14.23 приведен полный граф совместимостей соответствий. Каждый узел графа (кружок) выражает соответствие. Между двумя узлами проводится дуга (линия), если они совместимы. Отсутствие дуги между двумя узлами означает, что данные соответствия несовместимы.

Клика представляет собой набор взаимно совместимых соответствий. Например, набор соответствий $\{c-2, d-1, e-6\}$ составляет клику, а набор $\{c-2, b-1, e-6\}$ не является кликой, поскольку соответствия $b-1$ и $e-6$ несовместимы. Максимальная клика представляет собой клику, не являющуюся подмножеством другой, большей клики. Клика $\{c-2, d-1, e-6\}$ не является максимальной, поскольку она входит в бо́льшую клику $\{b-3, c-2, d-1, e-6\}$. В любом графе совместимости наибольшая максимальная клика представляет наиболее вероятное соответствие между объектом и эталоном.

Существует множество алгоритмов поиска максимальной клики графа [16, 17]. Приведенный ниже алгоритм, взятый из работы [18], не является самым эффективным, но он достаточно прост и эффективен. Алгоритм представлен в виде следующей рекурсивной процедуры:

```
Max Cs(C, P, S) =
BEGIN
  Settlement Y; COMMENT локальная переменная;
  If P = Empty Set THEN
    List C as a Maximal Clique
  ELSE RETURN; COMMENT тупиковая ветвь;
  Y Choose (P)
  Max Cs (C∪{Y}, P∩Neighbors(Y);
  S∩Neighbors(Y));
  Max Cs(C, P — {Y}, S∪{Y});
END;
```

C, P и S — множества узлов графа. Знаки ∪ и ∩ обозначают операции над множествами, соответственно объединение и пересечение множеств. «*Choose*» — функция, которая случайным образом выбирает один элемент множества. «*Neighbors*» — функция, которая отыскивает множество всех узлов, совместимых с узлом, заданным аргументом. Для нахождения всех максимальных клик графа вызывают процедуру *Max Cs* ({ }, ⟨множество всех узлов⟩, { }).

В машинном языке множество удобнее всего представить в виде двоичной последовательности. Каждому узлу графа соответствует некоторая позиция в последовательности. Единицы в этой позиции означают, что данный узел включен в множество. Тогда операции объединения и пересечения множеств выполняются весьма просто — с помощью логических операций ИЛИ и И. На графе, изображенном на рис. 14.24, имеется 4 максимальных клики:

$\{b-1, c-2\}$
$\{b-5, c-4\}$
$\{b-3, c-2, d-1, e-6\}$
$\{b-3, c-4, d-5, e-6\}$

Рис. 14.24. К методу максимальной клики. Максимальные клики непротиворечивых соответствий. Две большие клики соответствуют объекту и его зеркальному отображению

Существуют 2 максимальные клики из 4 элементов — одна соответствует объекту, другая — его зеркальному отображению. Если рассматриваемые объекты или эталоны обладают свойством симметрии, осуществляется проверка, в каком порядке расположены локальные признаки — в прямом или обратном. Иногда в правила построения соответствий или проверки совместимости вводят дополнительный признак, разрушающий симметрию, например относительную ориентацию сторон. Так, разница в угловом положении сторон *6* и *2* эталона составляет +135° (или —45°), а разница в

угловом положении сторон *e* и *c* объекта составляет +45° (или —135°). Таким образом, при учете взаимного положения сторон соответствия *e — 6* и *c — 2* становятся несовместимыми.

Рассмотренные примеры иллюстрируют главное свойство методов распознавания, основанных на составлении соответствий: чем более жесткие ограничения накладываются на анализируемые признаки, тем легче осуществить распознавание и более надежен его результат. При увеличении числа углов и дуг в графе резко возрастает время, требующееся для нахождения всех максимальных клик, поэтому любое достигнутое сокращение в возможных соединениях может дать существенный выигрыш во времени обработки. Типы ограничений, которые могут быть наложены на отдельные локальные признаки, в значительной мере зависят от природы самих признаков. Для того, чтобы достигнуть наивысшей эффективности, проектировщик распознающей системы должен использовать все особенности локальных признаков для формирования дополнительных ограничений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rosen, C., et al., Exploratory Research in Advanced Automation, Stanford Research Institute, First Report, December 1973; Second Report, August 1974; Third Report, December 1974; Fourth Report, June 1975; Fifth Report, January 1976; Machine Intelligence Research Applied to Industrial Automation, Sixth Report, November 1976; Seventh Report, August 1977; Eighth Report, August 1978.
2. Nitzan, D., et al., Machine Intelligence Research Applied to Industrial Automation, SRI International, Ninth Report, August 1979; Tenth Report, November 1980; Eleventh Report, January 1982; Twelfth Report, January 1983.
3. Gleason, G. J. and Agin, G. J., A Modular Vision System for Sensor-Controlled Manipulation and Inspection, *Ninth International Symposium on Industrial Robots*, Society of Manufacturing Engineers, Washington, D. C., March 1979, pp. 57—70.
4. Jarvis, J. F., Automatic Visual Inspection of Glass-Metal Seals, *Fourth International Joint Conference on Pattern Recognition*, IEEE Computer Society, Kyoto, Japan, November 1978, pp. 961—965.
5. Duda, R. O. and Hart, P. E., *Pattern Classification and Scene Analysis*, Wiley-Interscience, New York, 1973.
6. Casasent, D., Ed., *Optical Data Processing*, Springer-Verlag, 1978.
7. Rosenfeld, A., Sequential Operations in Digital Picture Processing, *Journal of the ACM*, Vol. 13, No. 4., October 1966, pp. 471—494.
8. Ballard, D. H. and Brown, C. M., *Computer Vision*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.
9. Uno, T., Mese, M., and Ejiri, M., Defect Detection in Complicated Patterns, *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 95, No. 2, March-Apr. 1973, pp. 90—97.
10. Roberts, L. G., Machine Perception of Three-Dimensional Solids, in Tippett, J. T. et al., Eds., *Optical and Electro-Optical Information Processing*, M. I. T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1965, pp. 159—197.
11. Sobel, I., Camera Models and Machine Perception, Technical Report AIM-121, Stanford Artificial Intelligence Project, May 1970.
12. Martelli, A., Edge Detection Using Heuristic Search Methods, *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 1, No. 2, August 1972, pp. 169—182.
13. Brownlee, K. A., *Statistical Theory and Methodology in Science and Engineering*, Wiley, New York, 1965.
14. Moravec, H., Towards Automatic Visual Obstacle Avoidance, *Proceedings of the Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Cambridge, *Massachusetts*, August 1977.
15. Birk, J., et al., Image Feature Extraction using Diameter-Limited Gradient Direction Histograms, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-1, No. 2, April 1979, pp. 228—235.
16. Augustson, J. G. and Minker, J., An Analysis of Some Graph-Theoretical Cluster Techniques, *Journal of the ACM*, Vol. 17, No. 4, October 1970, pp. 571—588.
17. Bron, C. and Kerbosch, J., Finding All Cliques of an Undirected Graph, *Communications of the ACM*, Vol. 16, No. 9, September 1973, pp. 575—577.
18. Bolles, R. C., Robust Feature Matching through Maximal Cliques, *Imaging Applications of Automated Industrial Inspection and Assembly*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Washington, D. C., April 1979, pp. 140—149.

Глава 15

ОРГАНИЗАЦИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ РОБОТА И СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

У. Рембольд, К. Блюм, университет г. Карлсруэ, ФРГ

15.1. Введение

СТЗ роботов могут использоваться при выполнении производственных операций по обработке деталей и сборке узлов. Для этого зрительная система должна найти деталь, идентифицировать ее, направить захват робота в требуемое место в нужном положении, обеспечить взятие детали и ее доставку в рабочую зону. Часто бывает, что эти операции необходимо выполнять на движущемся конвейере. Телевизионная камера СТЗ и робот имеют различные системы координат. Местоположение объекта определяется в системе координат телевизионной камеры. В то же время для захвата детали роботу необходима информация о ее местоположении относительно его собственной системы координат. Поэтому совместная работа СТЗ и робота требует перевода полученной об объекте информации из одной системы координат в другую. Такое преобразование может осуществляться двумя способами:

с использованием языка программирования высокого уровня для задания программы робота и (или) СТЗ;

без применения языка программирования робота.

15.2. Калибрование робота с использованием языка программирования высокого уровня

Большинство СТЗ обладает тремя свойствами, обеспечивающими совместимость с программным обеспечением робота:

распознаваемые детали описываются заданными пользователем символическими именами, представленными в виде символьной строки;

положение и ориентация изделий определяются в прямоугольной системе координат;

обучение распознаванию осуществляется методом показа, одновременно каждой детали присваивается символическое имя.

Идентификация деталей производится по вектору признаков, в число которых входят площадь, число отверстий, минимальный и максимальный диаметры, периметр и другие параметры. Обычно пользователю сами эти параметры не нужны. Система автоматически формирует вектор признаков для конкретной детали в процессе обучения. При выполнении программы система осуществляет сравнение заложенного в память вектора признаков с вектором, сформированным по результатам анализа образа.

Расширенная версия языка *VAL* (язык программирования для роботов фирмы «Юнимейшин») — *VAL — IIV* содержит несколько команд для сервисных программ, с помощью которых производят калибрование телевизионной камеры, идентифицируют детали и запоминают вектор признаков, связанный с символическим именем объекта. Программа пользователя обращается к СТЗ с помощью двух дополнительных операторов языка *VAL*: *VPICTURE* и *VLOCATE*. В результате выполнения оператора *VPICTURE* изображение сцены считывается и поэлементно записывается в буферную память. Первым действием оператора *VLOCATE* является поиск заданного объекта в буфере образов. Если объект не найден, программа переходит на заданную метку или приостанавливается и выдает сообщение об ошибке. В случае успешного поиска СТЗ запоминает положение и ориентацию объекта под идентификатором системы отсчета, которой присвоено имя объекта. Значения координат объектной системы отсчета отображаются в прямоугольную систему координат камеры и в базовую координатную систему робота. На рис. 15.1 изображена схема взаимодействия СТЗ и программы робота, написанной на языке *VAL — IIV*.

С помощью относительных систем отсчета пользователь может легко определить местоположение начала системы координат СТЗ относительно начала системы координат робота.

Относительная система отсчета описывает положение и ориентацию захвата или инструмента робота при помощи вектора смещения и матрицы вращения. Параметры положения определяются суммированием вектора смещения в относительной системе с вектором смещения самой относительной системы в базовой системе. Вычисление относительной ориентации производится аналогично путем перемножения матриц.

В ходе калибрования робот захватывает небольшой диск или кольцо и помещает его в поле зрения камеры. Затем в режиме

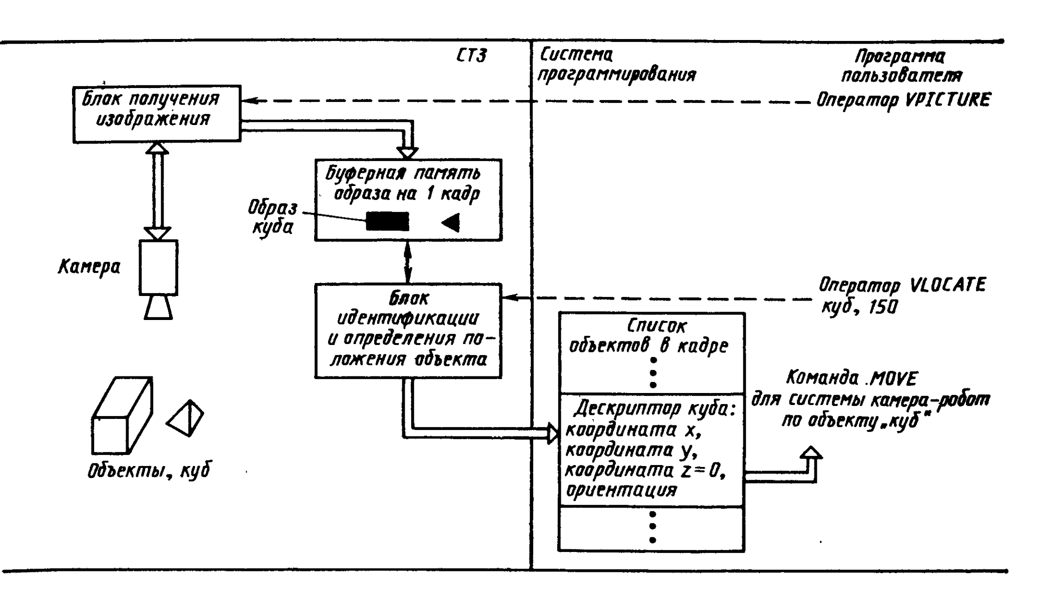


Рис. 15.1. Структурная схема взаимодействия СТЗ робота и системы программирования *VAL — IIv*

бучения захват робота перемещают к центру диска и определяют его положение и риентацию, данные о которых фиксируются и запоминаются в системе отсчета под менем *calib-robot*. После этого робот удаяется из поля зрения камеры. Приведенная ниже упрощенная программа показыает способ вычисления расположения нала координат и ориентации координатой системы камеры относительно координатной системы робота.

Геометрическая интерпретация пересчета тносительных координат приведена на ис. 15.2. Для упрощения показаны только екторы смещений. Аналогичные вычисления производятся и при определении оритации системы отсчета. Оператор *HERE* пределяет координаты центра диска (кординаты конца вектора *calib-robot*) относительно системы координат робота. Оператор *VLOCATE* определяет центр диска координаты конца вектора *calib-camera*) тносительно системы координат камеры, е. оба вектора указывают на одну и ту е точку в пространстве. После этого вектор *calib-camera* инвертируют. В результе вектор положения, обозначенный как *v-calib-camera*, указывает из центра дика в начало координат системы камеры. огда относительная система отсчета, соящая из векторов *calib-robot* и *inv-calib-mera*, определяет положение и ориентаю координатной системы камеры относительно координатной системы робота. Суммарный вектор из начала координатной системы робота указывает на начало координат системы камеры. Для упрощения обозначений результат запоминается в системе отсчета камеры. После того как указанные вычисления завершены, все операции над объектными векторами, полученными оператором *VLOCATE*, совершаются с помощью оператора *MOVE*, устанавливающего захват по относительным коорди-

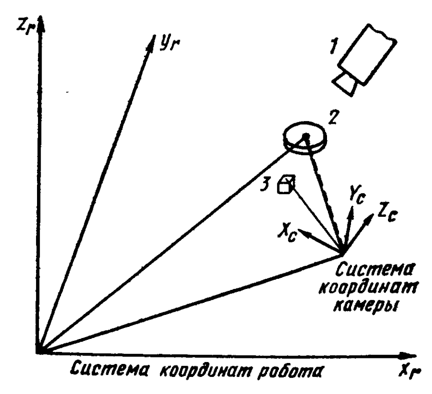


Рис. 15.2. Геометрическая интерпретация преобразований относительных систем координат камеры и робота:
1 — камера; *2* — диск; *3* — объект

натам в системе отсчета камеры. Приведенный пример подчеркивает необходимость введения понятия относительной системы отсчета и соответствующих геометрических преобразований при использовании СТЗ.

15.3. Организация взаимодействия СТЗ и робота без использования языков программирования

Процесс преобразования параметров положения объекта из координатной системы камеры в координатную систему робота представлен на рис. 15.3 и 15.4.

На рис. 15.3 изображена прямоугольная система координат, связанная с СТЗ. Для упрощения предположим, что используется матрица фотодиодов, содержащая 64 × × 64 элемента. Длину одного элемента обозначим единицей *PIX*. Современные телевизионные камеры обладают разрешающей способностью 256 × 256 элементов и более. Как правило, СТЗ имеет собственный процессор, который по двухмерному образу идентифицирует объект, определяет его положение и ориентацию. Два последних параметра необходимо передать в устройство управления роботом. В свою очередь, оно приводит в действие исполнительные механизмы, которые обеспечивают захват объекта и его перемещение в заданное место.

Для примера рассмотрим простейший робот с двумя степенями подвижности поступательного движения и двумя осями вращения (см. рис. 15.4), определяющими рабочее пространство. Перемещение по осям подъема и смещения может быть

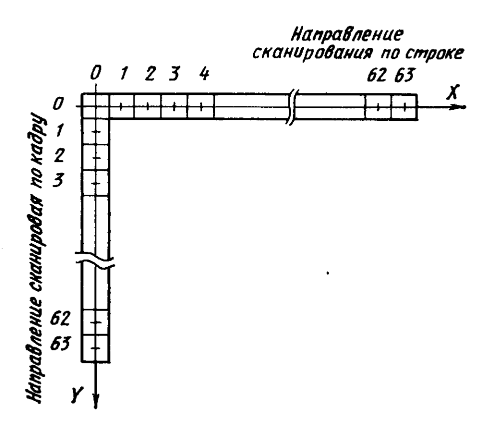


Рис. 15.3. Прямоугольная система координат камеры

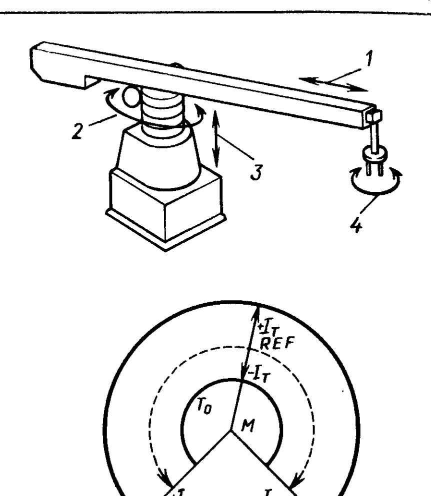


Рис. 15.4. Схематическое изображение робота и его рабочей зоны:
I_T — число элементарных шагов по оси перемещения; I_S — число элементарных шагов по оси поворота; *Ref* — исходное положение; *1* — ось линейного перемещения; *2* — ось поворота; *3* — ось подъема; *4* — ось вращения

представлено в виде числа элементарных перемещений (шагов) по этим осям. Перемещения относительно осей поворота манипулятора и вращения захвата можно выразить в единицах угловых приращений, измеряемых соответствующими датчиками.

Преобразование координат изделия, полученных относительно системы координат камеры, в координаты относительно системы координат робота требует соответствующих тригонометрических вычислений. Для роботов, обладающих несколькими степенями подвижности, эти вычисления могут оказаться весьма сложными. В рассматриваемом примере эти преобразования тривиальны.

При организации взаимодействия промышленного робота с СТЗ следует иметь в виду три его стороны: взаимодействие на физическом уровне, организацию протокола передачи данных и преобразования координат. В настоящее время еще не существует стандартных способов решения этой задачи, поэтому разработчики роботизированных систем полагаются прежде всего на собственную интуицию. При этом приходится учитывать ограниченные возможности датчиков и параметры системы управления манипулятора. В качестве типового интерфейса, обеспечивающего взаимодействие на физическом уровне, может использоваться интерфейс *RS232*.

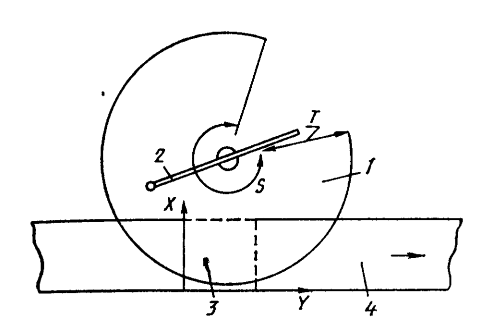


Рис. 15.5. Схематическое изображение рабочей зоны робота и СТЗ:
1 — рабочая зона робота; *2* — захват; *3* — поле обзора зрительной системы; *4* — транспортер

Для преобразования координат объекта в системе координат робота можно воспользоваться следующей методикой. На этапе обучения каждому объекту, распознаваемому СТЗ, ставится в соответствие программа обработки, выбираемая по номеру. Определяется положение манипулятора, необходимое для захвата объекта (как правило, оно не совпадает с центроидом его образа). Это осуществляется вручную путем перемещения захвата в требуемое положение и передачи координат этого положения в процессор СТЗ. Там полученные координаты пересчитываются относительно систем координат датчика. На основе этой информации определяются значения координат, необходимые для определения положения захвата в рабочем режиме.

В рабочем режиме устройство управления робота ожидает получения координат для захвата. После того как изделие идентифицировано зрительной системой, вычисляется положение захвата относительно системы координат СТЗ, после чего это положение пересчитывается в систему координат робота. Данные о положении осей координат, полученные путем пересчета, передаются в блок управления роботом вместе с номером изделия, присвоенным ему рабочей программой на стадии обучения. В устройство управления роботом загружается рабочая программа, скорректированная вновь полученными данными о координатных осях. На рис. 15.5 приведена схема взаимодействия робота и СТЗ.

15.4. Преобразование координат на этапе обучения

На этапе обучения система робот — СТЗ выполняет следующие операции:

изучение объекта зрительной системой;

определение с помощью робота точки захватывания;

составление рабочей программы обработки изделия.

Ниже рассматривается только процесс определения точки захватывания. Значения величин, относящиеся к этапу обучения помечены индексом L. Схема взаимодействия робота и зрительной системы изображена на рис. 15.5. Расположение прямоугольной системы координат телевизионного датчика относительно системы координат робота изображено на рис. 15.6. Буквами X, Y обозначена система датчика, а буквами T, S — система робота. В системе координат робота точка захвата G описывается положением оси перемещения T_G и оси поворота S_G в момент, когда захват робота находится точно над точкой захватывания. Расстояние H между точками G и M в системе координат робота выражается следующей формулой:

$$H_R = T_G + T_O,$$

где H_R выражено в элементарных шагах по оси перемещения I_T. То же расстояние в системе координат камеры:

$$H_S = H_R/F_T.$$

Постоянная величина T_O обозначает расстояние между захватом и осью поворота манипулятора, когда они находятся в исходных положениях. T_O измеряется числом

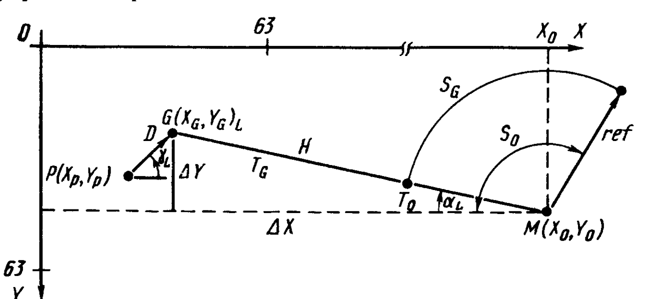


Рис. 15.6. Координатная система робота

элементарных приращений по оси линейного перемещения. Постоянная величина F_T представляет собой отношение числа единичных приращений по оси перемещения к длине одного элемента (I_T/PIX).

Постоянная величина S_O описывает положение оси поворота манипулятора, когда она расположена параллельно оси X координатной системы СТЗ. Постоянная величина F_S представляет собой количество элементарных приращений по оси поворота руки, соответствующих ее развороту на один градус (I_S/градус). Координаты точки G в системе координат СТЗ могут быть получены из следующих соотношений:

$$\Delta X = H_S \cos \alpha;$$
$$\Delta Y = H_S \sin \alpha.$$

15.5. Преобразование координат в рабочем режиме

В рабочем режиме выполняются следующие операции:

вычисление центра площади образа $P_A(X_P, Y_P)$;

идентификация объекта;

определение разворота изделия;

определение точки захватывания объекта относительно координатной системы СТЗ и точки $G_A(X_G, Y_G)$;

преобразование полученных координат точки захватывания в координатную систему робота.

Значения величин, полученных в рабочем режиме, обозначаются индексом A. На рис. 15.7 показано соотношение различных координат и важнейших параметров системы в рабочем режиме. После идентификации объекта и определения угла его поворота относительно исходного положения в координатной системе СТЗ определяется положение захвата, необходимое для захватывания объекта.

Разворот объекта определяется по формуле

$$\gamma_A = \gamma_L + \delta,$$

где γ_L — разворот на этапе обучения; δ — угол поворота относительно исходного положения.

Положение точки захватывания определяется в соответствии с формулами:

$$\Delta X = D \cos \gamma_A;$$
$$\Delta Y = D \sin \gamma_A;$$
$$X_G = X_P + \Delta X;$$
$$Y_G = Y_P + \Delta Y,$$

где X_P, Y_P — обозначают координаты центра площади объекта, полученные в рабочем режиме; D — расстояние между центром площади и положением точки захватывания.

Координаты положения точки захватывания необходимо преобразовывать в координатную систему робота. Для этого вычисляется положение оси вращения манипулятора

$$S_A = S_0 + \frac{F_S \operatorname{arctg}(Y_G - Y_0)}{X_0 - X_G}.$$

В результате получаем

$$X_G = X_0 - \Delta X;$$
$$Y_G = Y_0 - \Delta Y,$$

где X_0, Y_0 — координаты оси поворота манипулятора в координатной системе СТЗ. Таким образом определяется положение объекта. В рабочем режиме для каждого объекта вычисляются его координаты в различных положениях относительно исходного. Для решения этой задачи еще на этапе обучения определяется расстояние D между точкой захватывания $G(X_G, Y_G)$ и центроидом $P(X_P, Y_P)$ и разворот объекта. Расстояние D вычисляется по следующей формуле:

$$D^2 = (X_P - X_G)^2 + (Y_P - Y_G)^2,$$

а разворот объекта определяется как

$$\gamma = \frac{\operatorname{arctg}(Y_P - Y_G)}{X_G - X_P} \text{ [градус].}$$

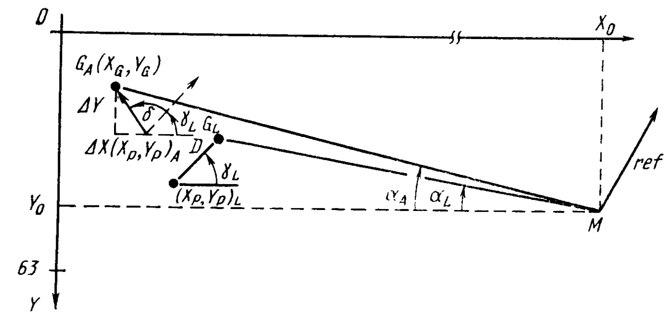


Рис. 15.7. К преобразованию координат в рабочем цикле

Для того, чтобы вычислить положение точки захватывания и преобразовать его в координатную систему робота, необходимо хранить в памяти следующие вспомогательные данные:

расстояние между положением точки захватывания и центром площади образа;

разворот изделия γ_L (градус);

угол α_L (градус);

номер рабочей программы N;

положение по оси вертикального перемещения манипулятора $H_L(I_H)$;

угол поворота захвата $R_L(I_R)$.

Положение по оси перемещения вычисляется при помощи следующей формулы:

$$T_A = F_T\,[(X_0 - X_G)^2 + (Y_0 - Y_G)^2]^{1/2} - T_0\,(I_T).$$

Угол поворота захвата определяется следующим образом:

$$R_A = R_L + F_R(\delta + \alpha_A - \alpha_L)\,(I_R)$$

$$\alpha_A = \frac{S_A - S_0}{F_S}\ [\text{градус}].$$

Положение по оси вертикального перемещения равно

$$H_A = H_L,$$

а номер рабочей программы соответствует

$$N_A = N_L.$$

В этих формулах R_L — угол поворота захвата, заданный на этапе обучения; F_R — число, отражающее разрешающую способность по углу (число единичных приращений в угловом градусе) I_R/градус; H_L — положение по вертикальной оси, заданное на этапе обучения.

Значения S_A, T_A, H_A, R_A и N_A передаются в устройство управления роботом. После этого робот может переместиться в вычисленное положение захватывания.

15.6. Измерение положения робота относительно системы координат СТЗ

В двух предыдущих разделах показано, как используются некоторые постоянные значения параметров (измеренные или вычисленные заранее) для определения и преобразования положения захвата. Эти постоянные значения определяются непосредственно в координатной системе робота или же в процессе взаимодействия СТЗ и робота. Соответственно, эти постоянные значения можно разбить на 2 группы:

а) T_0 — расстояние между центром захвата робота в исходном положении и осью поворота руки. T_0 измеряется в элементарных приращениях по оси перемещения I_I;

F_S — число элементарных угловых приращений по углу поворота манипулятора на градус (I_S/градус) (разрешающая способность по углу поворота манипулятора);

F_R — число элементарных угловых приращений по углу поворота захвата на градус (I_R/градус) (разрешающая способность по углу поворота захвата);

б) F_I — число элементарных приращений по оси перемещения руки в горизонтальной плоскости на элемент образа (I_T/PIX);

S_0 — угловое смещение руки в положении, параллельном оси X СТЗ;

X_0, Y_0 — координаты оси вращения руки относительно координатной системы СТЗ.

Постоянные величины, перечисленные в группе «а», измеряются внутренними датчиками робота. Для получения T_0 все элементы робота должны быть приведены в исходное положение. После этого измеряется расстояние между центром захвата и осью поворота руки и умножается на число элементарных перемещений по данной оси.

Значения постоянных величин F_S и F_R получают следующим образом. Робот приводится в исходное положение. В этом положении определяются значения управляющих переменных контура управления манипулятора. После этого рука поворачивается на 180° и снова считываются значения управляющих переменных. Затем берется разница между полученными значениями и делится на 180. Аналогично определяется значение F_R при вращении захвата.

Постоянные величины, входящие в группу «б», определяются во взаимодействии робота и СТЗ. Для этой цели робот и камера приводятся в некоторое фиксированное положение. С помощью робота небольшой диск, имитирующий объект, перемещается между тремя точками P_1, P_2 и P_3, находящимися в поле зрения камеры (рис. 15.8). Диск выбран в качестве имитатора объекта по следующим критериям:

вероятность ошибки при вычислении его центроида минимальна;

при его повороте отсутствуют геометрические искажения;

точка захватывания точно определяется координатами центроида.

Для каждой точки определяются значения координат (S_1, T_1), (S_2, T_2) и (S_3, T_3). Точки P_1 и P_2 выбираются при калибровании так, чтобы из первой можно было переместиться во вторую, изменив положение только звена поступательного перемещения.

Вторым требованием является возможность попадания робота из точки P_2 в точку P_3 только за счет поворота манипулятора. Поскольку центроид диска и точка его захватывания совпадают, то вычисление положения относительно системы координат СТЗ можно провести, определяя координаты центроида в точках P_1 и P_3. Таким путем достигается жесткая взаимосвязь между координатами объекта в координатных системах СТЗ и робота.

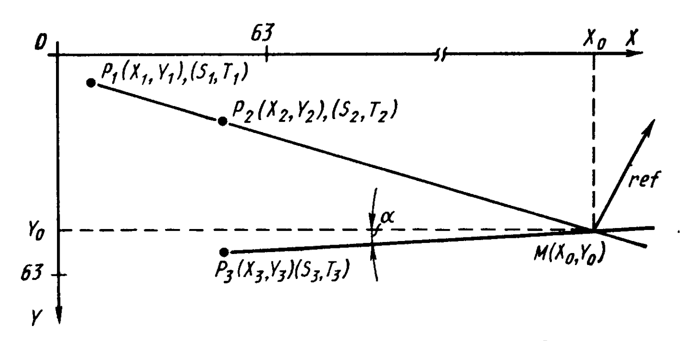


Рис. 15.8. Геометрическая интерпретация системы робот — СТЗ

Значения постоянных величин определяются следующим образом:

$$F = \frac{T_1 - T_2}{[(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2]^{1/2}}\quad (I_T/PIX),$$

где знаменатель представляет собой уравнение окружности

$$(X_0 - X_2)^2 + (Y_0 - Y_2)^2 = r^2$$

и

$$(X_0 - X_3)^2 + (Y_0 - Y_3)^2 = r^2.$$

Здесь

$$r = \frac{T_2 - T_0}{FT}.$$

Таким образом определяются координаты центра вращения манипулятора X_0, Y_0 относительно системы координат СТЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blume, C. and Jakokb, W., Programmiersprachen für Roboter, Vogel-Buchverlag, Würzburg, 1983.
2. Nehr, G. and Martini, P., The Coupling of a Workpiece Recognition System with a Robot, in Pugh, A., Ed., *Robot Vision*, Springer-Verlag, 1983.

Глава 16

СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ В РОБОТОТЕХНИКЕ

А. К. Кэк, университет Пэрдью, г. Вест Лафайетт, шт. Индиана

16.1. Введение

До сих пор основным препятствием широкому использованию программируемых манипуляторов в автоматизированном производстве является отсутствие адекватных систем очувствления. Из четырех разновидностей датчиков — касания, тактильных, дальномерных и зрительных — последние две используются не только для автоматизированного контроля, распознавания деталей и определения их ориентации, но также для управления скоростью перемещения манипулятора. Эта скорость должна быть высокой в начальной фазе движения и плавно снижаться к моменту непосредственного контакта с деталью, когда уже вступают в действие датчики касания и (или) тактильные преобразователи.

При использовании дальномерных и зрительных датчиков важную роль играет информация о расположении по глубине объектов, составляющих сцену. Информация о глубине пространства является важной, она необходима для управления скоростью движения манипулятора, приближающегося к изделию, ее же можно использовать и для анализа и распознавания трехмерных

сцеи вокруг манипулятора. Она может служить в качестве дополнительного признака при сегментации сцен. Более того, поверхность объекта можно полностью определить относительными расстояниями от зрительной системы до всех точек поверхности объекта. Эти расстояния можно использовать для нахождения трехмерных моментов, а также при анализе формы и определении ориентации.

Информацию о расстояниях можно получить различными методами. Один из наиболее привлекательных (но до последнего времени наиболее сложных и дорогих) — метод стереопары. Значительные вычислительные затраты на традиционные алгоритмы стереоскопического зрения связаны с тем, что для нахождения соответствия приходится рассматривать большое число корреляционных связей. Вначале на одном изображении стереопары выделяется группа элементов, затем на втором изображении отыскивается соответствующая ей группа. Современные методы более эффективны за счет использования для локализации пробных точек алгоритмов быстрого преобразования Фурье. Эти алгоритмы, реализованные на быстродействующих матричных процессорах, решают задачу соответствия, сравнивая локализованные области пересечения нулевого уровня в отфильтрованных стереообразах. Сравнение таких областей также выполняется на вычислительных средствах параллельной архитектуры.

К другим методам определения дальности в пространстве относятся применения лазеров, ультразвуковых устройств, инфракрасных приборов и кодированных апертур. Общее достоинство этих методов — отсутствие так называемого перекрывания, свойственного стереосистемам. Под перекрыванием понимается явление, при котором в районе критической дальности некоторые части сцены становятся невидимыми для одной из двух камер. Однако у этих методов имеются свои ограничения. Например, при использовании лазеров, мощность которых ограничивается соображениями безопасности обслуживающего персонала, для построения полной дальнометрической карты сцены в телесном угле 45° требуется очень большое время. В ультразвуковых системах, работающих в обычном эхо-импульсном режиме, невелико боковое разрешение. Для объектов простой формы оно может быть значительно улучшено (до значений, приближающихся к дифракционным пределам) с помощью синхронного детектирования. Ультразвуковые системы могут использоваться в агрессивной среде. Метод прямых триангуляционных измерений в инфракрасном свете также подвержен эффекту перекрывания. Пользуясь им, получают по одной дальнометрической точке за каждый замер, поэтому общее время на формирование всей карты может быть весьма значительным. Однако этот метод дешев, обладает устойчивостью к внешним воздействиям и может служить для грубой оценки глубины пространства.

Точность определения глубины пространства должна соответствовать решаемой задаче и согласоваться с возможностями других систем очувствления робота. Например, если требуется захватить определенную деталь и снять ее с поддона, на котором навалом лежит много деталей размером около нескольких дюймов, то для большинства практических случаев будет достаточно определить глубину пространства с точностью до четверти дюйма. В этой задаче информация о глубине сцены используется на начальном этапе для приближенного наведения на объект, а для точного окончательного контакта в момент захватывания используются точные силомоментные и тактильные датчики. Представляется, что для промышленного производства точность такого порядка может быть достигнута в устройствах, функционирующих практически в реальном масштабе времени, например, использующих структурированное освещение (см. разд. 3.1). Но такой подход не пригоден для построения СТЗ роботов общего назначения, поэтому в данной главе будут рассмотрены и другие варианты.

16.2. Перспективные преобразования и калибрование камер для стереоскопической дальнометрии

Математические соотношения, описывающие взаимное расположение точек в пространстве объектов и на формируемом камерой изображении, называются перспективными преобразованиями. Перспективные преобразования зависят от расположения камеры в фиксированной координатной системе, ее ориентации, определяемой углами панорамирования и наклона, а также фокусным расстоянием объектива (переменным в системах с трансфокатором). Несмотря на то что прямое преобразование однозначно определяет точку на изображении, соответствующую заданной точке в объектном пространстве, при обратном пространства. Однако если известны направление на заданную точку объектного пространства. Однако если известны направления на точку, полученные от двух или более камер, то пересекая их, можно определить положение точки в трехмерном объектном пространстве. Эти соображения лежат в основе определения дальности с помощью стереосистем.

Следовательно, применение перспективных преобразований для составления дальнометрических карт требует определения координат камеры, параметров ее ориентации и фокусного расстояния. Их можно определить несколькими способами. Наиболее просто воспользоваться аппаратными средствами, устанавливающими фокусное расстояние и углы панорамирования и наклона и передающими их значения в ЭВМ. При этом остаются неизвестными лишь координаты положения камеры. Если нет возможности пользоваться специальной аппаратурой, то приходится выполнять операцию калибровки в интерактивном режиме. Она заключается в записи координат нескольких (до десяти) точек объекта, местоположение которых в трехмерном пространстве известно. После этого осуществляется обработка полученных данных с целью извлечения требуемых параметров. Если камера смонтирована на панорамирующей головке, процесс калибровки должен выполняться с фиксацией головки в некотором известном положении. В дальнейшем информация об азимуте и угле места головки используется для коррекции уравнений перспективных преобразований.

Для вывода уравнений преобразований необходимо построить модель оптической системы. В связи с этим в следующем разделе рассматриваются важнейшие характеристики объективов.

16.2.1. Общие сведения об объективах телевизионных камер

Объективы телевизионных камер могут иметь фиксированное или переменное фокусное расстояние (при наличии трансфокатора). Для систем с фиксированным фокусным расстоянием процесс формирования изображения может моделироваться с помощью эквивалентной точечной диафрагмы, что упрощает вывод соотношений между точками объекта и точками изображения. Например, если объектив камеры имеет фокусное расстояние f, моделирование процесса формирования изображения будет заключаться в замене объектива точечной диафрагмой (рис. 16.1, *а*), расположенной на расстоянии f от плоскости изображения. Формат изображения $A \times B$ примерно одинаков для многих типов камер, где A и B равны соответственно 2 и 1,5 дюймам (около 5 и 3,8 см). При заданных размерах на плоскости изображения (см. рис. 16,1, *б*) значение угла зрения Ф непосредственно зависит от фокусного расстояния. Для иллюстрации этой зависимости в табл. 16.1 приведены соотношения между фокусным расстоянием и углом зрения в горизонтальной

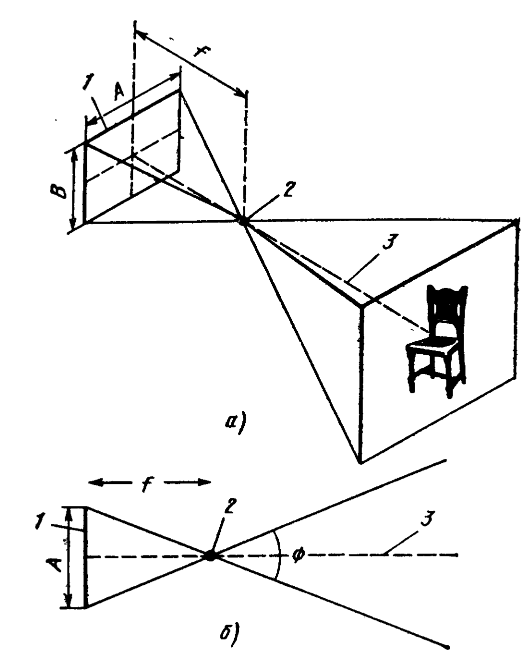


Рис. 16.1. Формирование изображения в телевизионной камере:

а — модель объектива в виде точечной диафрагмы; *б* — геометрическая интерпретация угла зрения системы; *1* — плоскость изображения; *2* — точечная диафрагма; *3* — оптическая ось

16.1. Параметры некоторых объективов фирмы «Кэнон»

Фокусное расстояние f, мм	Угол зрения φ, градус	Условное обозначение
1200	2,1	
500	5	
200	12	
85	29	
50	46	
28	75	
7,5	180	

плоскости для нескольких типов объективов фирмы «Кэнон». Глаз человека, когда он смотрит прямо, видит предметы четкими в пределах угла около 45° в горизонтальной плоскости. Судя по данным таблицы, такому углу зрения примерно соответствует объектив с фокусным расстоянием 50 мм. Такой объектив называют нормальным. Объективы с укороченными фокусными расстояниями, а следовательно, с расширенным углом зрения, называются широкоугольными, а с увеличенными фокусными расстояниями и, следовательно, с суженными углами зрения — телеобъективами.

У читателя может возникнуть вопрос: если объектив камеры можно представить в виде точечной диафрагмы (по крайней мере, для объективов с фиксированным фокусным расстоянием), почему не использовать саму эту диафрагму для формирования изображения. Однако несмотря на большое достоинство диафрагмы — бесконечную глубину резкости, это невозможно из-за бесконечно малого количества световой энергии, попадающей на светочувствительный детектор или пленку. Глубиной резкости называется диапазон расстояний, в пределах которого объекты воспроизводятся в плоскости изображения с резкими границами. Использование точечной диафрагмы для формирования изображения привело бы к необходимости бесконечно долгой экспозиции. Объектив используется для того, чтобы увеличить световой поток, воспринимаемый детектором от точки на объекте. На рис. 16.2 на объекте отмечена точка P, рассеивающая отраженный световой поток в широком телесном угле, и только часть этого потока, заключенная в пределах угла α, попадает в камеру. Значение угла зависит от размеров апертуры объектива. Телевизионная камера характеризуется максимальным значением апертуры, которое определяется либо диаметром объектива, либо более жесткими требованиями ограничения оптических искажений. Диаметр максимально допустимой апертуры выражается в долях фокусного расстояния (относительное отверстие). На-

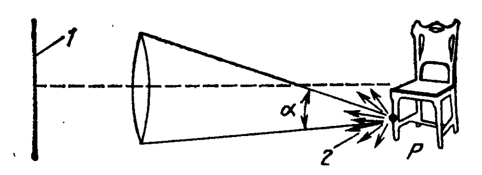


Рис. 16.2. Принцип собирающего действия объектива (линза собирает свет, рассеиваемый в конусе с углом α):
1 — плоскость изображения; 2 — рассеивающая точка

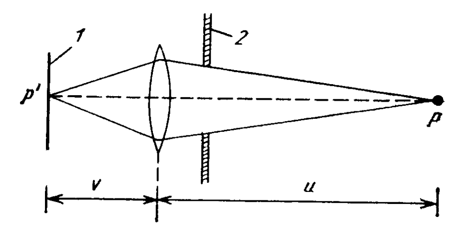


Рис. 16.3. К понятию глубины резкости:
1 — плоскость изображения; 2 — диафрагма

пример, объектив может быть охарактеризован двумя параметрами 50 мм и $f/1,4$. Это означает, что его фокусное расстояние равно 50 мм, а максимальная апертура соответствует диаметру $f/1,4 = 35,7$ мм.

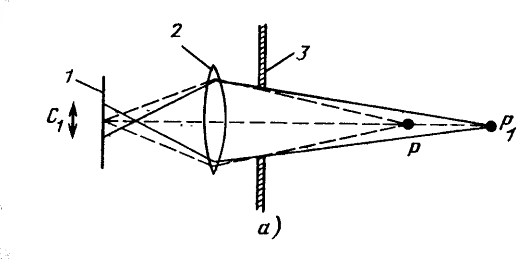
За использование объектива вместо точечной диафрагмы приходится платить уменьшением глубины резкости камеры. С другой стороны, в камерах с высокой чувствительностью при хорошем освещении (например, мощными осветительными лампами) допустимо использовать малые апертуры, приближающиеся к точечным. Там, где есть возможность создать такие условия, возросшая глубина резкости позволяет отказаться от фокусирования объектива.

Для пояснения понятия глубины резкости рассмотрим рис. 16.3, на котором показана единственная точка на оптической оси, которая в свою очередь в плоскости изображения фокусируется также в точку: точка на объекте P переносится в точку на изображении P'. Расстояние u до этой точки выражается формулой

$$\frac{1}{u}+\frac{1}{v}=\frac{1}{f}, \qquad (16.1)$$

где v — расстояние между плоскостью объектива и плоскостью изображения. Любая другая точка на оптической оси фокусируется в точку в другой плоскости, не совпадающей с плоскостью изображения. Проекции точек P_1 и P_2 (рис. 16.4) в плоскости изображения окажутся размытыми. Диаметр этого размытого изображения называется кружком рассеяния, а его значения для точек P_1 и P_2 обозначены C_1 и C_2. Глубина резкости объектива есть расстояние между двумя крайними точками иа оси по обе стороны от точки P, в которых диаметры кружков рассеяния в плоскости изображения равны заданному значению C (рис. 16.5).

В фотографии глубина резкости определяется значением C, равным $f/1000$. Обычно глубина резкости меньше для переднего плана и больше для заднего. Кроме фокусного расстояния объектива она зависит



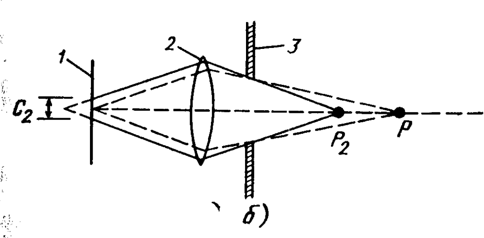


Рис. 16.4. К понятию кружка рассеяния:
1 — плоскость изображения; 2 — объектив; 3 — диафрагма

еще от расстояния до точки, на которую сфокусирована камера, и от размеров апертуры. Эти зависимости выражаются следующей формулой:

$$R=\frac{2CN\,(m+1)}{m^2}, \qquad (16.2)$$

где R — глубина резкости; C — допустимый диаметр кружка рассеяния; N — относительное отверстие, т. е. фокусное расстояние f, деленное на D — диаметр апертуры: $N = f/D$; m — увеличение; $m = v/u$.

Глубину резкости приходится учитывать, в частности, в СТЗ, камеры которых расположены на захвате робота. Если глубина резкости СТЗ велика, при любом расстоянии камеры от объекта не потребуется регулирования ее фокусировки. Отказ от автоматической фокусировки снижает себе-

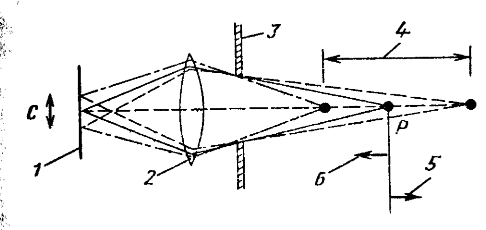


Рис. 16.5. Связь глубины резкости с кружком рассеяния:
1 — плоскость изображения; 2 — объектив; 3 — диафрагма; 4 — глубина резкости; 5 — задний план; 6 — передний план

стоимость, размеры и вес камеры, тем самым обеспечивая такие свойства системы, без которых применение камеры на захвате робота было бы невозможно [21]. В таких СТЗ глубину резкости увеличивают за счет более грубой дискретизации изображений, поскольку постоянное заданное значение C растет с увеличением размеров элемента изображения. Это не обязательно приводит к увеличению погрешностей в определении признаков объектов, поскольку при приближении камеры к объекту эффективная разрешающая способность на изображении объекта может оказаться сравнимой или даже более высокой, чем у неподвижно установленных камер.

16.2.2. Перспективное преобразование

Приведенный в данном разделе вывод уравнений преобразований предложен в работе [45] и подробно пояснен в учебном пособии [42]. При выводе принято, что местоположение камеры задается системой координат, начало которой расположено в фокусе объектива (рис. 16.6). Координатами этого фокуса являются проекции вектора **C** на прямоугольную систему координат. Фокус расположен на расстоянии f от плоскости изображения, измеренном вдоль оптической оси, которая на рисунке изображена жирной штриховой линией.

Ориентация камеры определяется единичным вектором $\hat{a}$, перпендикулярным к

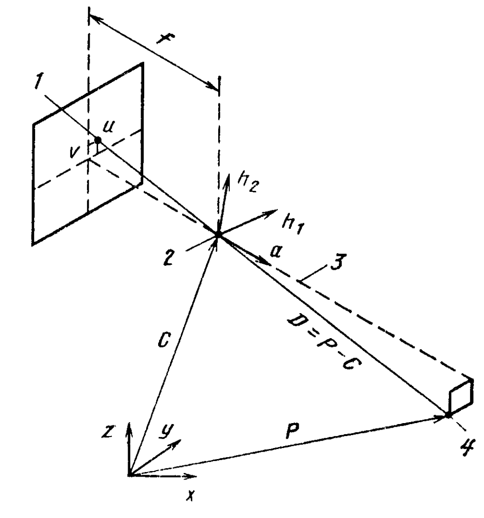


Рис. 16.6. Геометрическая интерпретация местоположения камеры в СТЗ:
1 — точка изображения; 2 — фокус; 3 — оптическая ось; 4 — точка объекта

плоскости изображения. Введем два дополнительных единичных вектора $\hat{\mathbf{h}}$ и $\hat{\mathbf{v}}$, ортогональных друг другу и направляющему единичному вектору **a**. Все точки плоскости изображения описываются выражением

$$\mathbf{C} - f\hat{\mathbf{a}} + u\hat{\mathbf{h}} + v\hat{\mathbf{v}}. \qquad (16.3)$$

Упорядоченные пары скалярных параметров u и v могут рассматриваться как координаты точки в плоскости изображения. Отметим, что $(\mathbf{C} - f\hat{\mathbf{a}})$ — вектор положения центра плоскости изображения.

Уравнения перспективных преобразований должны определять координаты (u, v) изображения любой точки P на объекте. Для вывода уравнений рассмотрим подобные треугольники (см. рис. 16.6). В результате получим

$$\frac{u}{f} = \frac{\mathbf{D}\cdot\hat{\mathbf{h}}}{\mathbf{D}\cdot\hat{\mathbf{a}}}; \quad \frac{v}{f} = \frac{\mathbf{D}\cdot\hat{\mathbf{v}}}{\mathbf{D}\cdot\hat{\mathbf{a}}}, \qquad (16.4)$$

где $\mathbf{D} = \mathbf{P} - \mathbf{C}$ — вектор, восстановленный из фокуса камеры в точку объекта. Указанных двух уравнений достаточно для определения точки на изображении, соответствующей точке на объекте. Преобразуем эти уравнения в форму, более удобную для обработки по дискретизированному изображению (образу). Другими словами, вместо аналоговых координат u и v рассмотрим соотношения для их дискретизированных значений I и J. Эти значения выражаются следующими формулами:

$$u = (I - I_0)\Delta u \ \text{ и } \ v = (J - J_0)\Delta v. \qquad (16.5)$$

На рис. 16.7 эти соотношения представлены наглядно. Показано, что I_0, J_0 представляют собой координаты центра образа. Горизонтальная координата I и вертикальная координата J отсчитываются от нижнего левого угла образа. В этих формулах

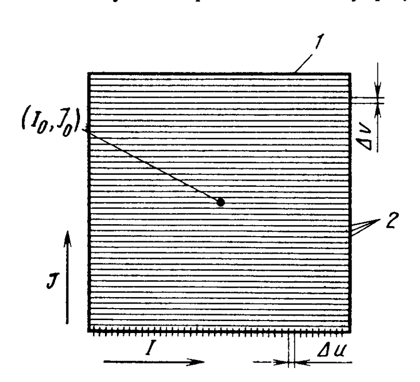


Рис. 16.7. Дискретизация изображения:
1 — плоскость изображения; *2* — строки сканирования

принято, что элемент с координатами (I_0, J_0) совпадает с центром координатной плоскости (u, v). Если требуется измерять координаты с точностью до долей элемента разложения и принятое условие не выполняется, то переход от аналогичных координат к цифровым должен производиться с учетом смещений, появляющихся в правой части уравнений.

Подставляя уравнение (16.5) в (16.4), получим:

$$I - I_0 = \frac{f}{\Delta u}\,\frac{\mathbf{D}\cdot\hat{\mathbf{h}}}{\mathbf{D}\cdot\hat{\mathbf{a}}}; \qquad (16.6)$$

$$J - J_0 = \frac{f}{\Delta v}\,\frac{\mathbf{D}\cdot\hat{\mathbf{v}}}{\mathbf{D}\cdot\hat{\mathbf{a}}}. \qquad (16.7)$$

Представим их в более удобной форме:

$$I = \frac{\mathbf{D}\cdot\mathbf{H}}{\mathbf{D}\cdot\hat{\mathbf{a}}} \ \text{ и } \ J = \frac{\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}}{\mathbf{D}\cdot\hat{\mathbf{a}}}, \qquad (16.8)$$

где

$$H = \frac{f}{\Delta u}\hat{\mathbf{h}} + I_0\hat{\mathbf{a}} \qquad (16.9)$$

и

$$\mathbf{V} = \frac{f}{\Delta v}\hat{\mathbf{v}} + J_0\hat{\mathbf{a}}. \qquad (16.10)$$

Важно отметить, что векторы **H** и **V** не являются единичными и не перпендикулярны к направляющему вектору $\hat{\mathbf{a}}$.

В телевизионных системах, используемых на практике, размеры интервалов дискретизации Δu и Δv могут и не совпадать, однако при их равенстве упрощаются многие алгоритмы распознавания. Например, при разных интервалах некоторые из геометрических свойств силуэтов могут измеряться в зависимости от ориентации объекта. В видиконных камерах для приравнивания Δu и Δv можно изменить параметры сканирования. В камерах интегрального исполнения это невозможно, поскольку в них интервалы дискретизации постоянны и определены жесткой геометрической структурой светочувствительных ячеек.

Заметим, что единичные векторы $\hat{\mathbf{h}}$ и $\hat{\mathbf{v}}$ направлены вдоль строк и столбцов дискретизированного изображения (это следует из способа получения коэффициентов I и J). В видиконах строки и столбцы не строго ортогональны, поскольку линии горизонтальной развертки имеют небольшой наклон, обусловленный непрерывностью кадровой развертки.

Поскольку нас интересует обработка образов, в дальнейшем мы не будем рассматривать единичные векторы $\hat{\mathbf{h}}$ и $\hat{\mathbf{v}}$, ограничиваясь векторами **H** и **V**.

16.2.3. Калибрование камеры

Калибрование камеры выполняется для определения векторов **C**, $\hat{\mathbf{a}}$, **H** и **V**. Поскольку длина вектора $\hat{\mathbf{a}}$ равна 1, остается определить 11 неизвестных компонентов. В принципе калибровку можно произвести путем предъявления, по крайней мере, 6 точек на объекте, для которых известны трехмерные координаты, и последующего составления 12 уравнений для неизвестных [каждой точке на изображении соответствуют два уравнения, аналогичных уравнениям (16.8) перспективных преобразований]. На практике вычисления калибровочных параметров упрощают, предъявляя системе более 10 некомпланарных точек, по которым составляется более 20 уравнений. Ниже приводится методика составления таких уравнений.

Обозначим местоположение известных точек объекта векторами $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \ldots, \mathbf{P}_N$. Соответствующие этим точкам векторы, восстановленные из фокуса камеры, обозначим $\mathbf{D}_m$ (рис. 16.8). Они определяются следующим образом:

$$\mathbf{D}_m = \mathbf{P}_m - \mathbf{C}, \qquad (16.11)$$

где $m = 1, 2, \ldots, N$. Пусть (I_m, J_m) — координаты на изображении m-й точки объекта. Используя уравнения перспективных преобразований (16.8), получим следующие соотношения:

$$I_m = \frac{\mathbf{D}_m\cdot\mathbf{H}}{\mathbf{D}_m\cdot\hat{\mathbf{a}}}; \quad J_m = \frac{\mathbf{D}_m\cdot\mathbf{V}}{\mathbf{D}_m\cdot\hat{\mathbf{a}}}, \qquad (16.12)$$

где $m = 1, 2, \ldots, N$. Рассмотрим все уравнения, соответствующие коэффициентам I_m. Их можно переписать в виде:

$$(\mathbf{D}_m\cdot\mathbf{H} - I_m\mathbf{D}_m\cdot\hat{\mathbf{a}}) = 0 \quad \text{при} \quad m = 1, 2, \ldots, N, \qquad (16.13)$$

или, используя уравнение (16.11), в эквивалентной форме:

$$\mathbf{P}_m\cdot\mathbf{H} - \mathbf{C}\cdot\mathbf{H} - I_m\mathbf{P}_m\cdot\hat{\mathbf{a}} + I_m\mathbf{C}\cdot\hat{\mathbf{a}} = 0. \qquad (16.14)$$

Отметим, что полученные уравнения нелинейны относительно неизвестных, поскольку в левой части имеются их произведения. Их можно линеаризовать. Введем вспомогательные переменные C_N и C_a:

$$C_N = \mathbf{C}\cdot\mathbf{H}; \quad C_a = \mathbf{C}\cdot\hat{\mathbf{a}}. \qquad (16.15)$$

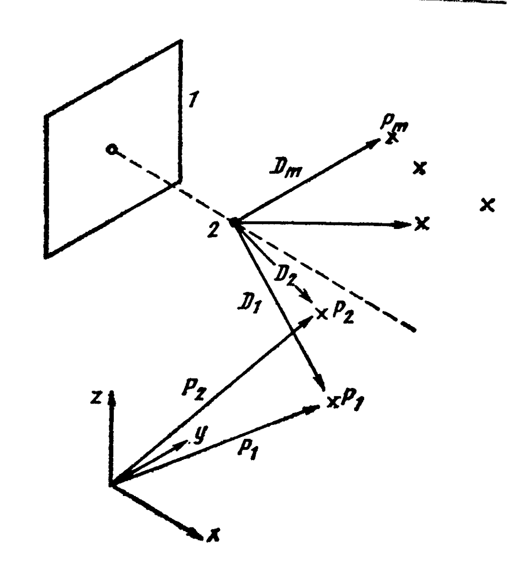


Рис. 16.8. Калибрование камеры методом показа:
1 — плоскость изображения; *2* — фокус

Тогда нелинейные уравнения (16.14) представляются в линейном виде:

$$x_mH_x + y_mH_y + z_mH_z - I_mx_ma_x - I_my_ma_y - C_H + I_mC_a = 0, \qquad (16.16)$$

где $m = 1, 2, \ldots, N$.

Система включает в себя N уравнений с восемью неизвестными: H_x, H_y, H_z, a_x, a_y, a_z, C_H и C_a. Это система однородных уравнений, поскольку все правые части равны 0. Для того, чтобы отыскать решения этих уравнений, предположим, что одна из переменных (a_x) равна 1. Очевидно, это противоречит требованию единичности вектора $\hat{\mathbf{a}}$. Однако это требование можно удовлетворить, если сначала вычислить a_y и a_z, а затем — остальные неизвестные. Все неизвестные будут линейно зависимы от a_x. Следовательно, если изменить значение a_x таким образом, что модуль $|\hat{a}|$ станет равным 1, то можно будет пропорционально пересчитать и все остальные неизвестные. Приравняв к единице величину a_x линейные уравнения можно переписать в иной форме:

$$x_mH_x + y_mH_y + z_mH_z - I_my_ma_y - I_mz_ma_z - C_H + I_mC_a = I_mx_m, \qquad (16.17)$$

где $m = 1, 2, \ldots, N$. Для наглядности выразим эти уравнения в векторно-матрич-

ной форме, определив вектор неизвестных **U** следующим образом:

$$\mathbf{U}=\begin{vmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \\ a_x \\ a_y \\ a_z \\ C_H \\ C_a \end{vmatrix}. \qquad (16.18)$$

Обозначив **W** матрицу коэффициентов уравнений (16.17), представим их в векторно-матричной форме:

$$[\mathbf{W}]\,\mathbf{U}=\mathbf{B}, \qquad (16.19)$$

где вектор **B** обозначает правую часть уравнений (16.17):

$$\mathbf{B}=\begin{vmatrix} I_1x_1 \\ I_2x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_Nx_N \end{vmatrix}. \qquad (16.20)$$

Для того, чтобы избавиться от погрешностей округления и дискретизации, а также устранить возможную несовместимость уравнений, вызванную нелинейностью камеры, вводится избыточность: N берется больше, чем число неизвестных. Выберем произвольно N равным 10. Строго говоря, если N будет больше 7, составленную систему уравнений нельзя решить из-за возмущений в значениях векторов $\mathbf{P}_m$, вызванных погрешностями измерений. Следовательно, вместо нахождения точного решения системы уравнений, мы переходим к задаче отыскания «наилучшего из возможных решений». Такое решение уравнения (16.19) означает, что необходимо найти набор значений неизвестных параметров, соответствующий минимальному значению выражения

$$\{[\mathbf{W}]\,\mathbf{U}-\mathbf{B}\}^T\{[\mathbf{W}]\,\mathbf{U}-\mathbf{B}\}, \qquad (16.21)$$

где T означает транспонирование. Отметим, что если бы существовало точное решение данной системы уравнений, оно обращало бы это выражение в 0. Можно показать, что решением, минимизирующим приведенное выражение, будет решение следующих нормальных уравнений [40]:

$$[\mathbf{W}]^T[\mathbf{W}]\mathbf{U}=[\mathbf{W}]^T\mathbf{B}. \qquad (16.22)$$

В отличие от уравнений (16.19), эта система имеет единственное решение, поскольку матрица $[\mathbf{W}]^T[\mathbf{W}]$ имеет размерность 7×7. Следовательно, имеются семь уравнений с 7 неизвестными. Хотя эти уравнения можно решить прямыми методами (например, методом исключения Гаусса или по алгоритму Гаусса — Жордана), на практике решение

$$\mathbf{U}=\{[\mathbf{W}]^T[\mathbf{W}]\}^{-1}\{\mathbf{W}\}^T\mathbf{B} \qquad (16.23)$$

получают более устойчивой с вычислительной точки зрения процедурой ортогонализации методами Грама — Шмидта или Хаусхолдера.

После того как найдены неизвестные (16.18), вычисляется длина результирующего вектора $\hat{\mathbf{a}}$. Затем все неизвестные делятся на отношение a_x к $|\hat{\mathbf{a}}|$. Нормализация необходима для того, чтобы сделать вектор $\hat{\mathbf{a}}$ единичным. Такая процедура обеспечивает нахождение наилучших возможных значений неизвестных, входящих в вектор-столбец (16.18). Для поиска оставшихся неизвестных рассмотрим неиспользованную систему уравнений (16.12) для J-х координат точек изображения. Если эти уравнения записать в развернутой форме, получим:

$$\mathbf{P}_m\cdot\mathbf{V}-\mathbf{C}\cdot\mathbf{V}-J_m\mathbf{P}_m\cdot\hat{\mathbf{a}}+J_m\mathbf{C}\cdot\hat{\mathbf{a}}=0. \qquad (16.24)$$

Вновь для устранения нелинейности введем вспомогательную переменную

$$C_V=\mathbf{C}\mathbf{V}. \qquad (16.25)$$

В терминах этой и ранее введенных переменных, определенных уравнением (16.15), линеаризованный вариант уравнений (16.24) будет выглядеть следующим образом:

$$x_mV_x+y_mV_y+z_mV_z-J_mx_ma_x-\\-J_my_ma_y-J_mz_ma_z-C_V+J_mC_a=0, \qquad (16.26)$$

где $m=1, 2, \ldots, N$. Эта система уравнений может быть решена по аналогичной методике нахождения оптимального решения для трех составляющих вектора **V** и C_V.

После того как будут найдены величины C_H, C_V и C_a, можно определить местоположение камеры, задаваемое компонентами вектора **C**. Для этого решается следующая система уравнений:

$$\mathbf{C}\cdot\hat{\mathbf{a}}=C_a;\\ \mathbf{C}\cdot\mathbf{H}=C_H; \qquad (16.27)\\ \mathbf{C}\cdot\mathbf{V}=C_V.$$

На этом процесс калибровки заканчивается.

16.3. Активные и пассивные стереоскопические системы

Как показано в предыдущем разделе, перспективные преобразования однозначно определяют координаты (I, J) элемента образа, соответствующие любой заданной точке в пространстве объектов. Однако по заданному элементу образа можно определить лишь направление на точку объекта. Объединив 2 направления на точку, полученных от разных камер *, можно теоретически их совместить, определяя местоположение указанной точки на объекте в трехмерном пространстве. Несмотря на то что на этом принципе основано большинство методов составления дальнометрических карт поля обзора, на практике именно в этом случае процедура триангуляционных вычислений может оказаться неработоспособной. Вследствие ошибок округления и дискретизации невозможно точно определить точку пересечения направлений вычисленных векторов. В данном разделе описывается методика, не требующая определения точки пересечения направляющих векторов в явном виде.

Обозначим калибровочные векторы, относящиеся к левой камере стереопары, $\mathbf{C}_L$, $\mathbf{H}_L$, $\mathbf{V}_L$ и $\hat{\mathbf{a}}_L$, а соответствующие им векторы для правой камеры — $\mathbf{C}_R$, $\mathbf{H}_R$, $\mathbf{V}_R$ и $\hat{\mathbf{a}}_R$. Обозначим (I_L, J_L) и (I_R, J_R) координаты на левом и правом образе, соответствующие одной и той же точке $\mathbf{P}=(x, y, z)$, расположенной на объекте (рис. 16.9). Из

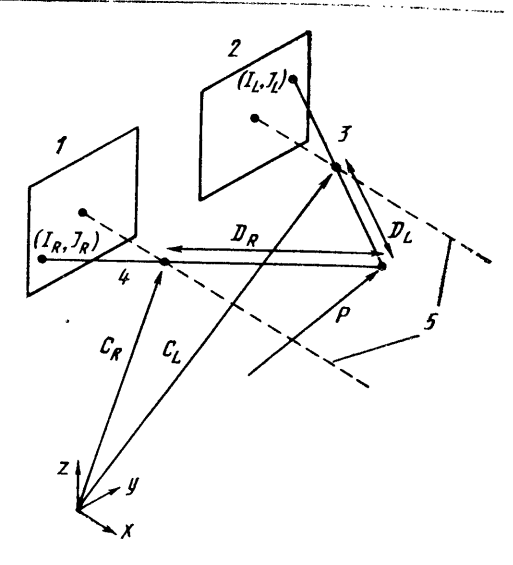


Рис. 16.9. Калибрование камер стереосистемы:

1 — правое изображение; 2 — левое изображение; 3 — левый фокус; 4 — правый фокус; 5 — оптические оси

уравнения (16.8) получаем:

$$I_L=\frac{\mathbf{D}_L\cdot\mathbf{V}_L}{\mathbf{D}_L\cdot\hat{\mathbf{a}}_L};\quad J_L=\frac{\mathbf{D}_L\cdot\mathbf{H}_L}{\mathbf{D}_L\cdot\hat{\mathbf{a}}_L}, \qquad (16.28)$$

где $\mathbf{D}_L$ — вектор, восстановленный из фокуса левой камеры в точку **P** объекта. С вектором $\mathbf{C}_L$ он связан следующим соотношением:

$$\mathbf{D}_L=\mathbf{P}-\mathbf{C}_L. \qquad (16.29)$$

Из этих уравнений определяем только направление вектора $\mathbf{D}_L$, проходящего от элемента на левом образе. Поскольку теперь его величина нас не интересует, можно принять, что

$$\mathbf{D}_L\cdot\hat{\mathbf{a}}=1. \qquad (16.30)$$

Следовательно, выражения для I_L и J_L примут вид:

$$\mathbf{D}_L\cdot\mathbf{V}_L=\mathbf{I}_L;\quad \mathbf{D}_L\cdot\mathbf{H}_L=J_L. \qquad (16.31)$$

В скалярной форме уравнения (16.30) и (16.31) можно представить через три составляющие вектора $\mathbf{D}_L$, обозначенные $\mathbf{D}_{L,x}$; $\mathbf{D}_{L,y}$; $\mathbf{D}_{L,z}$:

$$D_{L,x}a_{L,x}+D_{L,y}a_{L,y}+D_{L,z}a_{L,z}=1;\\ D_{L,x}V_{L,x}+D_{L,y}V_{L,y}+D_{L,z}V_{L,z}=I_L;\\ D_{L,x}H_{L,x}+D_{L,y}H_{L,y}+D_{L,z}H_{L,z}=J_L. \qquad (16.32)$$

Эти уравнения решаются относительно трех неизвестных составляющих вектора $\mathbf{D}_L$. От-

* Грубо оценить дальность можно с помощью одной камеры. Если перемещать объектив камеры с малой глубиной резкости вдоль оптической оси, то получаемое изображение оказывается сфокусированным только на каком-то одном фиксированном расстоянии объектива от плоскости изображения. Следовательно, воспользовавшись автоматическим определением сфокусированности изображения, можно использовать информацию о положении объектива в момент фокусировки для оценки дальности. Заметим, однако, что глубина резкости, определяемая уравнением (16.2), обратно пропорциональна диаметру апертуры объектива. Для того, чтобы сформировать таким способом дальнометрическую карту поля обзора с высокой точностью, потребуется камера с огромным объективом. Читатель может самостоятельно в этом убедиться, подсчитав из уравнения (16.2) диаметр объектива, требуемый для получения глубины резкости, например, порядка 0,5 см.

метим, однако, что из-за сделанного нами предположения (16.30), вычисленные значения для, составляющих вектора $\mathbf{D}_L$ дают информацию только о направлении. Величина этого вектора, хотя и не равна 1, не дает какой-либо полезной информации. Следовательно, можно утверждать, что действительный вектор, соединяющий фокус левой камеры с точкой на объекте, будет $r\mathbf{D}_L$, где r — неизвестная скалярная постоянная.

Информацию, полученную из правого образа, используем для определения r. Для этой цели вновь обратимся к перспективным преобразованиям координат элемента образа I_R и J_R:

$$I_R = \frac{\mathbf{D}_R \cdot \mathbf{V}_R}{\mathbf{D}_R \cdot \hat{\mathbf{a}}_R}; \quad J_R = \frac{\mathbf{D}_R \cdot \mathbf{H}_R}{\mathbf{D}_R \cdot \hat{\mathbf{a}}_R}. \qquad (16.33)$$

Из рис. 16.9 можно выразить вектор $\mathbf{D}_R$:

$$\mathbf{D}_R = \mathbf{P} - \mathbf{C}_R = = r\mathbf{D}_L + \mathbf{C}_L - \mathbf{C}_R. \qquad (16.34)$$

Подставив уравнение (16.34) в оба уравнения (16.33), получим следующие варианты вычисления r:

$$r = \frac{I_R \Delta \cdot \hat{\mathbf{a}}_R - \Delta \cdot \mathbf{V}_R}{\mathbf{D}_L \cdot \mathbf{V}_R - I_R \mathbf{D}_L \cdot \hat{\mathbf{a}}_R} \qquad (16.35)$$

и

$$r = \frac{J_R \Delta \cdot \hat{\mathbf{a}}_R - \Delta \cdot \mathbf{H}_R}{\mathbf{D}_L \cdot \mathbf{H}_R - J_R \mathbf{D}_L \cdot \hat{\mathbf{a}}_R}, \qquad (16.36)$$

где $\Delta = \mathbf{C}_R - \mathbf{C}_L$. (16.37)

Новый вектор Δ, называющийся базовым, определяет базу стереопары, т. е. взаимное расположение и расстояние между камерами в пространстве.

Рассмотрим частный случай, когда базовый вектор параллелен горизонтальной плоскости, а направляющие векторы $\hat{\mathbf{a}}_L$ и $\hat{\mathbf{a}}_R$ параллельны друг другу (сведение отсутствует) и перпендикулярны к базовому вектору. При указанных предположениях можно вывести следующие равенства:

$$\Delta \cdot \mathbf{V}_R = 0; \quad \Delta \cdot \hat{\mathbf{a}}_R = 0. \qquad (16.38)$$

Таким образом, выражение (16.35) уже не годится для вычисления r, а выражение (16.36) упрощается и принимает вид:

$$r = \frac{-\Delta \cdot \mathbf{H}_R}{\mathbf{D}_L \cdot \mathbf{H}_R - J_R \mathbf{D}_L \cdot \hat{\mathbf{a}}_R}. \qquad (16.39)$$

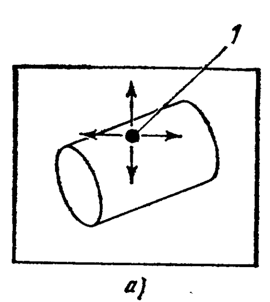
16.3.1. Стереоскопические системы, использующие структурированный свет

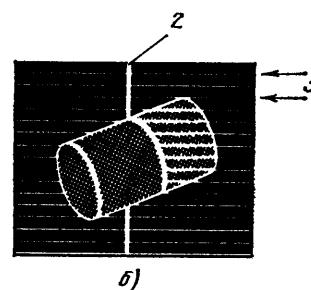
Изложенная в предыдущем разделе методика отождествления точек объекта эффективна только, если известны их координаты на левом и правом изображениях. Задача определения пар элементов двух образов, соответствующих одной и той же точке объекта, называется задачей соответствия. Эта задача довольно сложна, поскольку отображения небольшой поверхности объекта на различных образах стереопары могут отличаться как вследствие перспективных искажений, так и из-за зависимости условий отражения света от угла зрения. Кроме того, из-за перекрытия для некоторых из пробных точек одного образа может не найтись аналогов на другом. Поэтому выбор подходящих пробных точек, выполняющийся еще до определения их соответствия, приобретает особое значение. Например, если элемент одного образа выбран на ровной плоскости, то на другом образе ему невозможно сопоставить аналог, поскольку почти все элементы в окрестности будут иметь примерно одинаковую яркость.

Задача выбора пробных элементов на двух образах и их сопоставления облегчается, если на объект спроецировать узор из световых пятен или полосок и эти пятна, полоски или места их пересечения использовать в качестве пробных точек. На рис. 16.10 изображены три возможных варианта таких узоров. Простейший случай — это единственное световое пятно, находящееся на объекте (рис. 16.10, *а*). Такой прием решает одновременно все проблемы как выбора пробных точек, так и определения соответствия элементов. Сканированием можно построить полную дальнометрическую карту сцены. Основным недостатком такого метода является значительное время сканирования. Если освещенное пятно формируется узконаправленным лучом, то определение положения точки по стереопаре, рассмотренное в предыдущем разделе, существенно упрощается. Там было показано, что с помощью одной камеры можно определить только направление на точку в объектном пространстве, но не расстояние от нее. При использовании узконаправленного луча и одной камеры можно не только установить направление на освещающее пятно, но и, определив точку пересечения оптической оси камеры с направлением луча, найти координаты освещаемой точки объекта в трехмерном пространстве.

Из методов, использующих единственную освещаемую точку, можно рассмотреть еще одну достаточно простую процедуру, которая при наличии одной камеры позволяет определить дальность до точки и не предъявляет больших требований к вычислительной мощности. Эта процедура, впервые предложенная в работе [41], предполагает использование камеры совместно с линзой Френеля (рис. 16.11). Записывая сигналы с помощью видиконной или твердотельной камеры и произведя простейший анализ пространственного распределения частот вдоль двух перпендикулярных осей в плоскости изображения, можно получить координаты освещенной точки.

Более быстрые способы формирования дальнометрических карт требуют исполь-





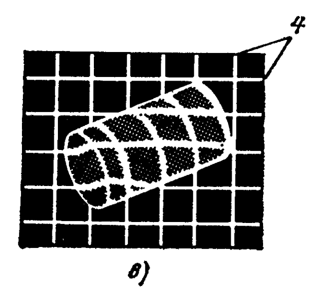


Рис. 16.10. Конфигурация излучаемых структур для выбора пробных точек в виде светового луча (*а*), световых полосок (*б*) и световой решетки (*в*):

1 — световое пятно; *2* — световая полоска; *3* — строки телевизионного изображения; *4* — световые полоски

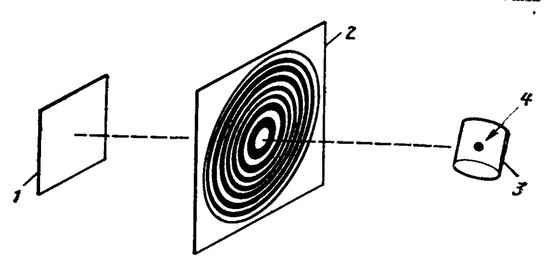


Рис. 16.11. Использование интерференции для определения расстояний:

1 — плоскость регистрации; *2* — пластина с линзой Френеля; *3* — объект; *4* — световое пятно

вания световой полоски, освещающей сцену (рис. 16.10, *б*). Пробные точки для согласования стереообразов в данном случае образуются в местах пересечения линий сканирования со световой полоской на объекте. При этом согласование образов не составляет труда, поскольку каждая сканирующая строка пересекается со световой полоской только в одной точке. Координаты элементов двух образов, соответствующих одной и той же точке объекта, используются для составления части дальнометрической карты, расположенной вдоль полоски на объекте (по формулам, приведенным в предыдущем разделе). Полная карта сцены получается сканированием световой полоской. При использовании для формирования полоски узконаправленного светового луча и априорно известном его направлении можно вычислить полную дальнометрическую карту, имея лишь одну камеру (так же, как и для случая освещения единственной точки объекта).

Метод использования световой полоски может не дать хороших результатов, если поверхность объекта почти параллельна направлению освещения. Это затруднение можно преодолеть, используя для освещения 2 взаимно перпендикулярных луча. Если ими производить сканирование, то на поверхности объекта появляется световой узор в виде сетки (см. рис. 16.10, *в*). Впервые способ определения дальностей, использующий вычисление направлений на объект с помощью камеры и априорно известной информации о направлении освещающего объект луча, был предложен в работах [1] и [39]. Эти методы относятся к группе триангуляционной дальнометрии.

К группе триангуляционных методов относится еще один простой прием, используемый в некоторых камерах для автофокусировки. На рис. 16.12 приведена схема, иллюстрирующая его принцип. Колеблющийся светодиод освещает сцену узким лучом света. Приемный фотодиод, направленный по оси камеры, воспринимает от-

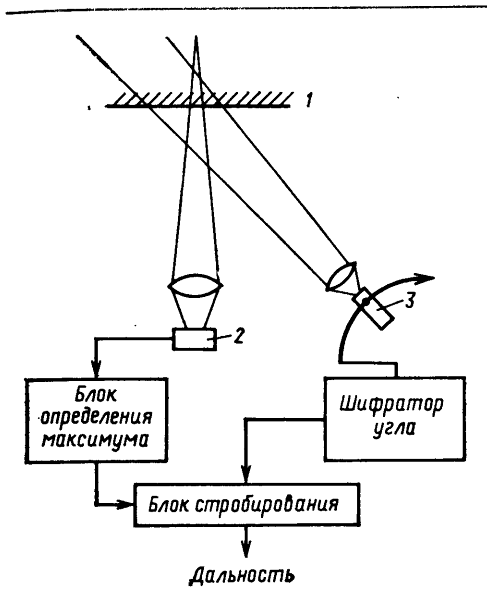


Рис. 16.12. Определение дальности методом сканирования светового луча:
1 — объект; *2* — детектор; *3* — светодиод

раженный от объекта световой поток. Максимум отраженного сигнала, получаемого фотодиодом от объекта, находящегося на известном расстоянии, будет соответствовать совершенно определенному углу излучения светодиода. Кодированное значение угла, зафиксированное в момент максимума сигнала фотоприемника передается в вычислитель, где по нему определяется расстояние до объекта. В камерах с автофокусировкой одновременно с колебаниями излучающего светодиода объектив передвигается вдоль своей оси и останавливается в момент максимума сигнала фотодиода.

16.3.2. Алгоритм Марра — Поджио — Гримсона

Если внешнее активное освещение сцены невозможно, то для выбора пробных точек и решения задачи соответствия применяют методы, рассмотренные в настоящем и следующем подразделах. В настоящем подразделе описывается алгоритм Марра — Поджио — Гримсона * [12, 13, 23, 24]. Этот алгоритм представляет собой попытку имитировать — хотя бы на низшем уровне — свойство зрительной системы человека вос-

* Этот алгоритм основан на рассмотренных Марром и Поджио [23, 24] свойствах стереоскопического зрения человека и на результатах моделирования на ЭВМ, выполненного Гримсоном [12, 13].

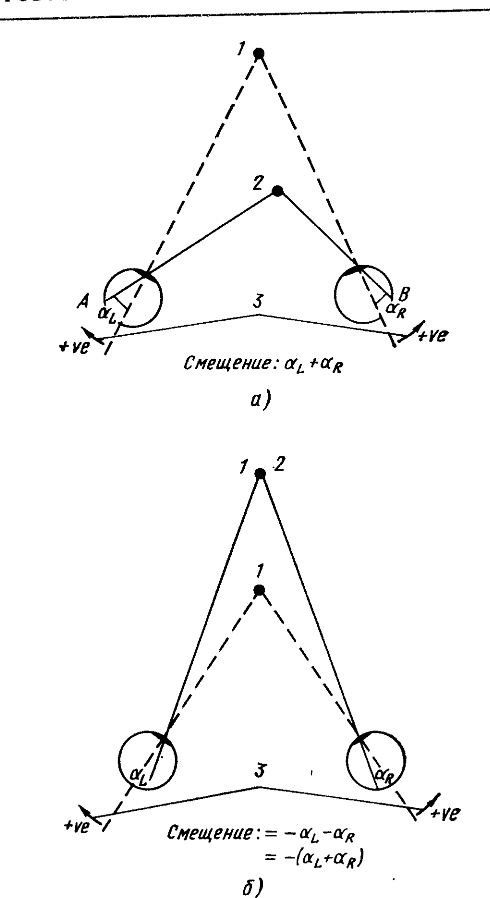


Рис. 16.13. Геометрическая интерпретация сходящегося (*а*) и расходящегося (*б*) смещений:
1 — точка фиксации фокуса; *2* — точка объекта; *3* — положительные значения угла

принимать глубину пространства путем бинокулярного совмещения.

Для того, чтобы пояснить рассматриваемый алгоритм, введем несколько определений. На рис. 16.13, *а* изображены две камеры, оптические оси которых пересекаются в точке фиксации фокусов *. Приведенное на рисунке расположение некоторой точки объекта приводит к возникновению ее изображения на элементах A и B образов левой и правой камер соответственно. Как показано на рисунке, каждому элементу можно поставить в соответствие его угловое смещение относительно оптической оси. Если α_L и α_R — угловые смещения двух элементов, соответствующих одной и той же точке объекта, то так называемое смещение d точки объекта можно определить как

* На данном и некоторых других рисунках (где рассматривается положение точки фиксации фокусов камер относительно точки нахождения объекта) левая и правая камеры изображены в виде глаз, образующих стереопару. Такое изображение привычно для восприятия и дает возможность быстро и наглядно представить взаимное расположение объектов и точек фиксации фокусов.

$$d = \alpha_L + \alpha_R. \qquad (16.40)$$

При этом положительные значения этих величин отсчитываются так, как показано на рисунке. Считается, что точка объекта обладает сходящимся, или пересекающимся, смещением, если она находится впереди точки фиксации фокусов камер (см. рис. 16.13, *а*). (Поводом к такому названию послужило следующее: для того, чтобы оптические оси обеих камер могли пересечься на данной точке объекта, их необходимо сводить). Наоборот говорят, что точки объекта, расположенные за точкой фиксации фокусов камер, обладают расходящимся, или непересекающимся, смещением (рис. 16.13, *б*). Необходимо отметить, что для точек объекта со сходящимся смещением элемент, соответствующий точке в образе правой камеры всегда будет правее соответствующего элемента образа левой камеры и, наоборот, для точек с расходящимся смещением элемент, соответствующий точке в образе правой камеры всегда будет левее соответствующего элемента образа левой камеры.

Выбор пробных точек. Для выбора пробных точек в соответствии с рассматриваемым алгоритмом используется следующая последовательность операций.

1. В качестве пробных могут выбираться только те элементы, на которых происходит резкое изменение яркости, поскольку в противном случае поиск соответствующих им элементов другого образа будет слишком сложным.

2. Такие резкие изменения яркости соответствуют местам пересечения с нулевым уровнем преобразования Лапласа данного образа, т. е. математическим выражением местоположения таких элементов будут нули функции

$$\nabla^2 f(x, y), \qquad (16.41)$$

где

$$\nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}. \qquad (16.42)$$

3. Перед тем как производить указанное преобразование, образ подвергается сгла-

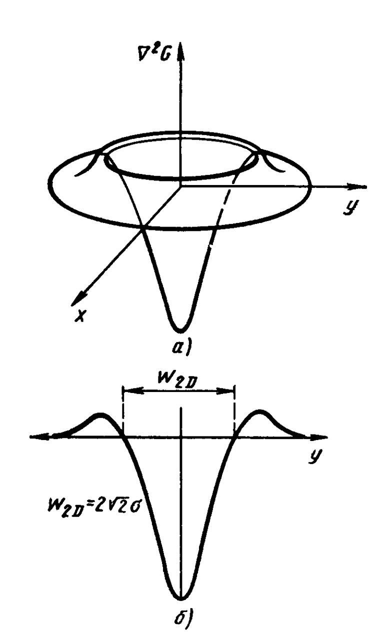


Рис. 16.14. Оператор первичной свертки $\nabla^2 G$ (*а*) и его сечение осью y (*б*):
w_{2D} — ширина главного лепестка оператора на нулевом уровне

живанию при помощи свертки с гауссоидой вида

$$G(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right). \qquad (16.43)$$

4. Операции по пп. 2 и 3 можно объединить в одну путем свертки образа со следующей функцией:

$$\nabla^2 G(x, y) \equiv \frac{r^2 - 2\sigma^2}{\sigma^4} \exp(-r^2/(2\sigma^2)), \qquad (16.44)$$

где

$$r^2 = x^2 + y^2. \qquad (16.45)$$

На рис. 16.14, *а* представлен трехмерный график этой функции, а на рис. 16.14, *б* — его сечение плоскостью $x = 0$. В соответствии с определением, приведенным в работе [12], шириной главного лепестка этой функции является расстояние между первыми нулями, расположенными по обе стороны от начала координат. Эта величина обозначается w_{2D} и выражается через σ следующим образом:

$$w_{2D} = 2\sqrt{2}\,\sigma. \qquad (16.46)$$

Оператор $\nabla^2 G$ носит название *оператора первичной свертки*. Результат воздействия

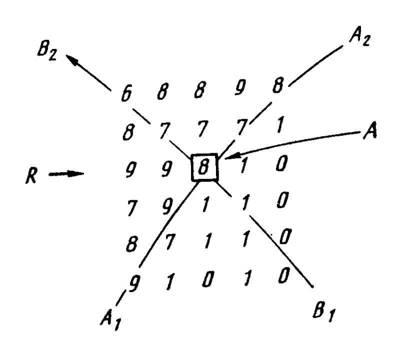


Рис. 16.15. Пример распределения уровней яркости в образе:

A_1A_2 — направление локального контура; B_1B_2 — направление локального градиента

этого оператора на образ будем называть первичной сверткой.

Параметры пробных точек. Каждая пробная точка характеризуется двумя параметрами — направлением изменения в ней знака оператора свертки и ориентацией локального контура, образованного линией пересечения оператора с нулевым уровнем. Изменение знака с положительного на отрицательный в операторе свертки соответствует переходам яркости исходного образа с более низких на более высокие уровни, и наоборот. Для иллюстрации на рис. 16.15 показан фрагмент образа с некоторыми гипотетическими уровнями яркости в окрестности элемента A. Если к данному фрагменту применить оператор первичной свертки, его результирующие значения слева от линии A_1A_2 будут положительными, а справа — отрицательными, переходя через нуль на границе между этими областями. Для получения результатов с точностью до долей элемента местоположение границы определяют путем интерполяции между элементами с положительным и отрицательным значением оператора на элементах каждой строки образа. В рассматриваемом примере при сканировании слева направо каждой строки точка пересечения оператора с нулевым уровнем приписывается данному элементу образа при выполнении условия смены знака оператора свертки на следующем элементе. Если оператор на следующем элементе остается равным нулю, то смена знака должна произойти на последующем элементе. Следовательно, если в строке R (см. рис. 16.15) нулевое пересечение приписано элементу A, то A становится кандидатом на характерную точку. Пересечение оператором свертки нулевого уровня в данной точке соответствует яркостному переходу в образе с высокого уровня на низкий. Направление

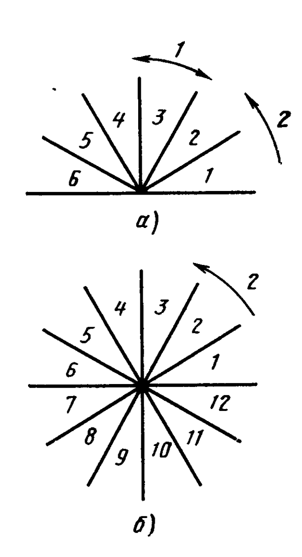


Рис. 16.16. Дискретизация направлений локальных контуров без учета (*а*) и с учетом (*б*) знака градиента:

1 — шаг дискретизации; 2 — направление отсчета углов

линии A_1A_2 задает ориентацию локального контура.

Простейшим способом оценки ориентации локального контура является определение положения нулевых пересечений на одной или двух строках выше и ниже пробного элемента. По методике Гримсона (хотя он и не дает точного описания способа вычисления направлений локального контура) для их представления используется 6 уровней дискретизации (рис. 16.16, *а*). В рассматриваемом примере обе операции — определение изменения знака и ориентации — объединены, так что направление градиента определяется в диапазоне 0—360° (рис. 16.16, *б*). Для этого сначала с помощью оператора Собеля формируется числовая карта градиентов для всех элементов образа *. Сначала для каждого эле-

* Поскольку градиент указывает направление наибольшего изменения, он всегда оказывается перпендикулярным к направлению локального контура.. На рис. 16.15 направление градиента показано кривой B_1B_2. Для вычисления градиента яркости в образе существует множество операторов. Здесь приводится оператор Собеля [36]. Использование локального градиента в качестве критерия для определения направления границы эквивалентно определению ориентации локального контура по пересечению соответствующим оператором нулевого уровня.

A_1	A_2	A_3
A_8	$f(m,n)$	A_4
A_7	A_6	A_5

Рис. 16.17. Нумерация элементов для оператора Собеля

мента изображения вычисляются две составляющие оценки локального градиента яркости по горизонтальной (x) и вертикальной (y) координатам:

$$X = (A_3 + 2A_4 + A_5) - (A_1 + 2A_8 + A_7);$$
$$Y = (A_1 + 2A_2 + A_3) - (A_7 + 2A_6 + A_5),$$

где A_m — соседние элементы, пронумерованные, как показано на рис. 16.17. Направление θ градиента вычисляется из следующего соотношения:

$$\theta = \operatorname{arctg}(Y/X).$$

В нуле оператора ориентация локального контура вычисляется путем усреднения градиентов по группе 3×3 соседних элементов. Весь угловой диапазон градиентов делится на 12 интервалов, что соответствует шагу дискретизации 30° (см. рис. 16.16).

Выбор значения w_{2D}. При реализации алгоритма Марра — Поджио определяющим моментом является выбор ширины главного лепестка первичного оператора свертки. Благодаря введению этого понятия можно наиболее просто объяснить необходимость поэтапной обработки. При поэтапной реализации алгоритма кандидаты на характерные точки отыскиваются сначала при большой величине w_{2D}. Процедурой установления соответствий таких точек на левом и правом образах строится ориентировочная укрупненная дальнометрическая карта сцены. Полученная информация в дальнейшем используется для уточнения соответствия выбранных точек операторами с меньшими значениями w_{2D}. Этот метод более подробно рассмотрен в следующем подразделе на примере обработки фотографий. Сначала исследуются точки, определенные в качестве характерных операторов с большим значением w_{2D}.

Предположим, что с помощью такого оператора в качестве кандидатов были выбраны на левом и правом образах точки, изображенные на рис. 16.18. Предположим также, что известно максимальное значение смещения d_{max}. Выберем точку A в качестве первой пробной точки на левом образе. Пусть в действительности на правом образе ей соответствует точка B. Для на-

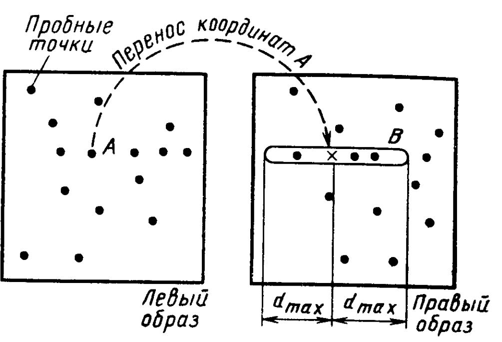


Рис. 16.18. Построение окрестности поиска при нахождении соответствий

хождения соответствующей точки сначала производится перенос координат точки A на правый образ (это место обозначено $\times$). Далее вокруг точки x строится окрестность поиска, размер которой равен d_{max} по обе стороны от x. При поиске соответствий необходимо иметь в виду следующие три обстоятельства.

1. Все пробные точки, попавшие в окрестность поиска и имеющие аналогичный знак изменения яркости или одинаковую с пробной точкой ориентацию линии нулевого пересечения, рассматриваются как вероятные соответствия для A. Считается, однако, что из всех вероятных соответствий действительным является только одно, а все остальные являются ложными. Для большинства пробных точек левого образа найдется только одно соответствие на правом образе. Однако в протяженных областях, выпадающих из поля зрения одной камеры, пробной точке на одном из образов может соответствовать несколько пробных точек на другом образе. Поскольку до настоящего времени отсутствуют процедуры, позволяющие эффективно работать с такими областями, здесь они не рассматриваются. Число таких точек возрастает с увеличением базы стереосистемы. Выбор базы осуществляется на основе компромисса между требованием высокой точности оценки дальности (для чего базу следует увеличивать) и желанием уменьшить ту часть сцены, которая оказывается перекрытой для одной из камер (для чего базу между камерами следует сокращать).

2. Число возникающих ложных точек зависит как от размеров окрестности поиска, так и от величины w_{2D}. Поскольку соседние нулевые пересечения на большей части образа не могут располагаться ближе, чем на расстоянии w_{2D}, то, чем эта величина больше, тем меньше появится кандидатов в окрестности поиска. В идеальном случае в ней должна быть всего одна соответ-

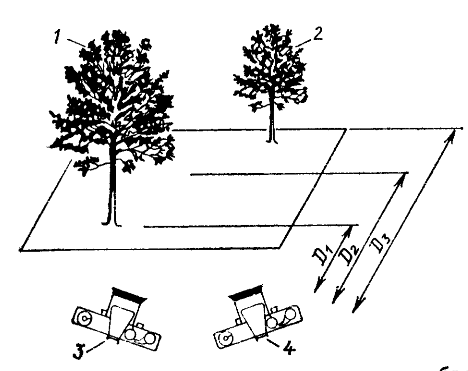


Рис. 16.19. Получение стереопары изображений:

1 — дерево № 1; *2* — дерево № 2; *3* — левая камера; *4* — правая камера

ствующая точка. Размер окрестности поиска примерно равен максимально возможному значению смещения. Следовательно, чтобы уменьшить число ложных точек, величина w_{2D} должна быть примерно равной d_{max}.

3. Установив w_{2D} равной d_{max}, получим значение шага дискретизации по дальности — d_{max}. Как правило, такой шаг дискретизации достаточен для построения приближенной дальнометрической карты сцены.

Пример обработки фотографий. На этом примере рассмотрим некоторые дополнительные особенности алгоритма поиска соответствий. Предположим, что на рассматриваемой сцене имеются два дерева (рис. 16.19), причем наибольший диаметр кроны каждого из них не превышает расстояния $(D_3 - D_1)$ между ними. Определим точку фиксации фокуса точно на середине расстояния между деревьями, т. е. на дальности $D_2 = (D_1 + D_3)/2$. Тогда максимальное значение смещения приблизительно равно разности $D_3 - D_2$ (или, что то же самое, $D_2 - D_1$).

На рис. 16.20, *а* показаны левый и правый образы сцены. Проведем операцию их сглаживания путем свертки с гауссоидой, у которой параметр w_{2D} равен d_{max}. Результат сглаживания представлен на рис. 16.20, *б*. После такой операции изменения яркости в образе каждого дерева могут быть обнаружены только на расстояниях, бóльших чем d_{max}. Применение к полученному образу преобразования Лапласа приводит к результату, представленному на рис. 16.20, *в*, где изображены линии пересечения оператора с нулевым уровнем.

Проведя свертку образов с первичным оператором свертки, имеющим ширину главного лепестка w_{2D}, можно утверждать, что большинство линий его пересечения с нулевым уровнем образовали контуры, нахо-

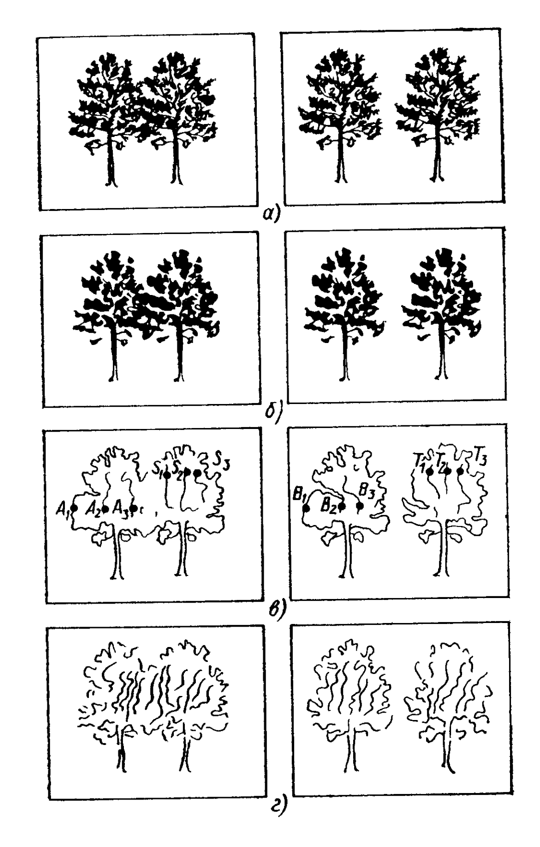


Рис. 16.20. Обработка стереоизображений:

а — исходные левое и правое изображения; *б* — образы, полученные обработкой первичным оператором свертки с шириной главного лепестка w_{2D}, равной максимальному ожидаемому смещению; *в* — линии пересечения с нулевым уровнем оператора Лапласа, примененного к образам (*б*); *г* — линии пересечения с нулевым уровнем оператора свертки с шириной главного лепестка w_{2D}, много меньшей, чем в случае (*б*)

дящиеся друг от друга на расстояниях, не меньших чем w_{2D}. Рассмотрим нулевые пересечения, отмеченные на рис. 16.20, *в*. Для того, чтобы найти элемент, соответствующий точке A_1, перенесем ее координаты на правый образ и построим вокруг этой точки окрестность поиска. Теоретически в этой окрестности должна быть только точка B_1, однозначно соответствующая A_1. Аналогично точке A_2 найдем соответствие B_2 и т. д. Вследствие сделанного предположения, что диаметр кроны деревьев меньше расстояния между ними, будут справедливы следующие соотношения:

$$A_1 \sim B_1 \simeq A_2 \sim B_2 \simeq \simeq A_3 \sim B_3 \qquad (16.47)$$

— смещение в данном случае соответствует расстоянию в глубину от дерева № 1 до точки фиксации фокуса;

$$S_1 \sim T_1 \simeq S_2 \sim T_2 \simeq \simeq S_3 \sim T_3 \qquad (16.48)$$

— смещение, которое соответствует расстоянию от дерева № 2 до точки фиксации фокуса, где $A_1 \sim B_1$ — смещение, полученное при нахождении соответствия A_1 и B_1, и т. д. Следовательно, смещение для точек A_1, A_2 и A_3 приблизительно одинаково и равно расстоянию от дерева № 1 до точки фиксации фокуса. Точно так же смещение для точек S_1, S_2 и S_3 примерно одинаково и равно расстоянию от дерева № 2 до точки фиксации фокуса.

Таким образом, установив значение w_{2D} равным d_{max}, мы решили проблему ложных соответствий и получили возможность измерять расстояния в глубину сцены. Однако, карта дальностей при этом получается грубой, поскольку на каждом дереве получилось только 6 пробных точек. Для более точного определения очертаний каждого дерева не хватает характерных точек, а выбранные нами точки A_1, A_2, A_3 и другие могут и не соответствовать понятию «характерная», так как после применения рассмотренных преобразований получены сильно расфокусированные образы, в которых яркость не может изменяться резко.

Понятия приближения и поэтапной стереоскопической обработки. Для повышения точности определения дальности следует увеличивать число характерных точек на фрагменте образа. Для этого необходимо выполнить следующие операции.

1. Для того, чтобы осуществить приближение фрагмента, содержащего дерево № 1, следует использовать усредненное по этому фрагменту значение смещения. Это означает, что в ЭВМ точка фиксации фокуса условно переносится с места ее первоначальной установки на рассматриваемый фрагмент. Программно это реализуется простым сдвигом горизонтальных координат правого образа на величину, равную усредненному значению смещений точек A_1, A_2 и A_3.

2. Произвести свертку левого и правого образов с новым оператором первичной свертки, у которого ширина главного лепестка w_{2D} примерно соответствует наибольшему возможному диаметру дерева. Это новое значение w_{2D} существенно меньше использовавшегося на предыдущем этапе, поэтому можно ожидать, что полученная после обработки плотность пробных точек на каждом образе будет выше, чем ранее (рис. 16.20, *г*).

3. Для того, чтобы избавиться от ложных точек, размеры окна поиска следует уменьшить до нового значения w_{2D}.

4. В результате для фрагмента, содержащего дерево № 1, получаем малый шаг дискретизации по дальности, однако при этом теряется возможность находить соответствия для фрагмента образа, содержащего дерево № 2. Для того, чтобы повысить точность определения дальностей для деталей дерева № 2, следует применить аналогичную процедуру и осуществить приближение фрагмента, содержащего дерево № 2.

Рассмотренная процедура представляет собой двухэтапную обработку стереообразов сцены (см. рис. 16.19) с целью формирования ее дальнометрической карты. На первом этапе производится разделение деревьев № 1 и 2, а на втором этапе уточняются дальномерные данные для каждого из деревьев. При необходимости можно было бы добавить и третий этап, на котором выбрать еще меньшее значение w_{2D} и производить приближение отдельно для каждой из частей обоих деревьев и при этом определять дальности с еще большей точностью.

Известно, что зрительная система человека обладает возможностью обеспечивать пять различных режимов работы при определении смещения [13]. Этим пяти режимам соответствуют значения w_{2D}, равные 63, 35, 17, 9 и 4 условным элементам. Под элементом здесь понимается размер зрительного рецептора зоны фовеа. Одному рецептору соответствует угловой диапазон зрения, приблизительно равный 0,4 угловых минуты. Такое значение разрешающей способности, приближающееся к характеристике человеческого глаза, можно получить, если угловой диапазон в 4° по каждой стороне разделить на матрицу из $650 \times \times 650$ элементов. Приведенные размеры условных фильтров выражены в элементах, определенных именно в этом смысле. Для СТЗ роботов типичным значением угла зрения является 45°. Для таких углов весьма затруднительно обеспечивать просмотр зоны обзора с разрешающей способностью, соответствующей способности человеческого глаза. По сравнению с образами, воспринимаемыми человеком, образы в зрительной системе робота всегда получаются грубо дискретизированными. Грубая дискретизация образов приводит к возникновению ложных контуров при воспроизведении границ. Ложные контуры могут приводить к сбоям в работе алгоритмов обработки стереообразов, основанных на обнаружении границ, к которым относится рассматриваемый ниже алгоритм.

Обработка методом приближения образов сложных сцен. Рассмотренная выше обработка сцен методом приближения может использоваться, если в сцене имеются лишь отдельные неперекрывающиеся по дальности объекты. Для обработки сложных сцен процедура должна быть модифицирована. В опытах по машинной имитации человеческого стереоскопического зрения Гримсон использовал полученные на этапах грубой оценки дальности значения смещений для поочередного приведения фрагментов образа к диапазону действия точных этапов. Необходимо отметить, что более точными методами поочередно обрабатывались не объекты, а фрагменты сцены. Предположим, что, следуя методике Гримсона, путем сравнения нулевых пересечений оператора свертки отыскиваются соответствия с параметром w_{2D}, соответствующим разрешающей способности 9 элементов. Анализируемый образ разделен на 25×25 фрагментов. Если в некотором фрагменте найдены соответствия менее чем для 70 % нулевых пересечений, считается, что такой фрагмент не соответствует диапазону действия точного метода. В этом случае для данного фрагмента не применимы значения смещений, полученные по ширине главного лепестка w_{2D}, соответствующей 9 элементам. Таким образом, значения смещений, полученные методами грубой оценки дальности, используются для управления степенью приближения с целью согласования размеров анализируемых фрагментов с диапазоном действия точных методов. Как и в рассмотренном выше случае, в программе для ЭВМ приближение реализуется путем добавления некоторого сдвига по координатам элементов данного фрагмента, при этом величина сдвига равняется смещению, определенному по методу грубой оценки.

В СТЗ образы сцен получают с использованием грубой дискретизации, например, 128×128 (или 256×256) элементов для угла зрения 45°. В рассматриваемом примере с помощью двухэтапной обработки сцены, имевшей глубину 3 м (10 футов), наилучшие результаты были получены при разделении образа на 10×10 фрагментов для последующего приближения и обработки на втором этапе. Несмотря на то что по теории вероятностей пороговым значением, определяющим соответствие размеров фрагмента и диапазона действия метода точной оценки, является, по крайней мере, 70 %, наилучшие результаты были получены автором при 50 % значении порога принятия решения.

Необходимо отметить, что принцип анализа методом последовательного приближения аналогичен способу рассматривания сцен человеком, когда сначала обозревается целиком вся сцена, внимание не фокусируется на отдельных предметах и создается общее впечатление о взаимном расположении основных объектов в сцене, а затем внимание поочередно останавливается на каждом представляющем интерес объекте. В ЭВМ приближение реализуется просто путем сдвига одного образа относительно другого.

Различение множественных соответствий. В рассмотренном примере с фотографиями было принято идеализированное предположение, что если поле поиска на правом образе ограничено интервалом, равным w_{2D} с обеих сторон от координат пробной точки левого образа, то ложных соответствий не возникает. Можно показать [12], что для реальных образов, у которых плотность распределения вероятности интервалов между нулевыми пересечениями подчиняется закону Райса [35], и с учетом ориентации контуров, получаемых при нулевых пересечениях и используемых при нахождении соответствий, вероятность получения двух соответствий, т. е. двух линий нулевого пересечения примерно одинаковой ориентации в пределах интервала поиска $\pm w_{2D}$ (как на рис. 16.18 от точки $\times$) равна 20 %.

Если обнаруживается больше одного вероятного соответствия, для их различения используется следующая процедура. Все точки возможного соответствия в пределах окрестности поиска подразделяются на три группы: 1 — группа точек с расходящимся смещением, в которую входят все вероятные соответствия, находящиеся слева от точки $\times$ (см. рис. 16.18) на расстоянии, превышающем 1 элемент разложения; 2 — группа точек, обладающих сходящимся смещением, включающая все вероятные соответствия, находящиеся справа от точки $\times$ на расстояниях, бо́льших чем 1 элемент разложения; 3 — группа точек с нулевым смещением, включающая все вероятные соответствия, находящиеся в пределах 1 элемента разложения от точки $\times$.

Если во всех трех группах имеется только одна соответствующая точка, она принимается за действительную, вычисляется ее смещение, которое и приписывается рассматриваемой пробной точке. Если в любой из трех групп обнаруживается больше одной соответствующей точки, то пробной точке вообще не приписывается соответствие и она остается необработанной. Если по одной вероятной соответствующей точке обнаруживается в нескольких группах, то считается, что пробная точка имеет множественное соответствие. Различение выполняется с помощью так называемого эффекта затягивания, суть которого состоит в анализе других, однозначных, соответствий в ближайшей к данной пробной точке области (для рассматриваемого примера — в пределах 10×10 элементов), вычислении значений смещения для этих соответствий и выборе для данной точки преобладающего в пределах области значения. Например, если имеется 2 вероятностных соответствия для пробной точки — одно из группы со сходящимся смещением, другое — из нулевой группы, а в ближайшей области из 10×10 элементов большинство соответствий имеют сходящееся смещение, то и для данной точки выбирается соответствие из группы со сходящимися смещениями. Если же среди вероятных для данной пробной точки соответствий отсутствует соответствие, приблизительно равное преобладающему значению смещения, такая точка оставляется необработанной. Правило различения, основанное на эффекте затягивания, отражает свойство, справедливое для большинства образов, в соответствии с которым смещение может изменяться преимущественно только плавно. Резкое изменение смещения происходит только в местах больших изменений дальности.

Результаты, полученные двухэтапным алгоритмом обработки образов. Приведем сначала результаты, полученные одноэтапным вариантом рассмотренного выше алгоритма. В эксперименте брали стереопару изображений (дискретизируемых далее на 128×128 элементов) — трубные тиски, расположенные на расстоянии около 1,8 м (6 футов) от базовой линии стереосистемы. После обработки первичным оператором свертки с шириной главного лепестка w_{2D}, равной 8 элементам, получали образы. Затем получали линии пересечением этих образов с нулевым уровнем. Локальная ориентация этих линий квантовалась по многоуровневой шкале. В результате применения процедуры отыскания соответствий строили карту дальностей.

Рассмотрим теперь действия двухэтапного алгоритма при обработке сцены с диапазоном дальности до 3 м в угле зрения 45°. В опыте брали стереопару образов сцены (две табуретки), разложенных на матрицу из 128×128 элементов. Точка фиксации фокуса камер была установлена на расстоянии посередине между табуретками, а дальняя табуретка была расположена на расстоянии около 2 м от камер. Для данной сцены точка, расположенная на максимальной дальности, получала смещение 12 элементов. Для того, чтобы получить линии нулевых пересечений, образы были обработаны оператором первичной свертки, определяемым уравнением (16.44), с параметром w_{2D}, равным 12 элементам. В результате этой обработки получали соответствующие линии нулевого пересечения. Как и в одноэтапном варианте, локальная ориентация линий полученных контуров была квантована по многоуровневой шкале. Затем получали карту смещений после грубой обработки образов. Яркость точек на этой карте была пропорциональна дальности, определенной грубым оператором: чем темнее элемент, тем дальше он был расположен от базовой линии стереокамер. На рис. 16.21 приведена гистограмма смещений образа, полученных на этапе грубой оценки. Различным пикам гистограммы можно поставить в соответствие объекты, расположенные на разных дальностях. Следовательно, гистограмму рис. 16.21 можно интерпретировать как указывающую на присутствие двух объектов, один из которых характеризуется смещениями, примерно равными 2—3 элементам, а другой — примерно 4—5 элементам. Положительные значения смещений соответствуют объекту, находящемуся позади точки фиксации фокуса, и наоборот. Полученные грубые оценки смещений используются для приближения, необходимого для согласования размеров обрабатываемых участков с диапазоном обработки точного оператора свертки. Затем получали фильтрацию образов первичным оператором свертки с параметром

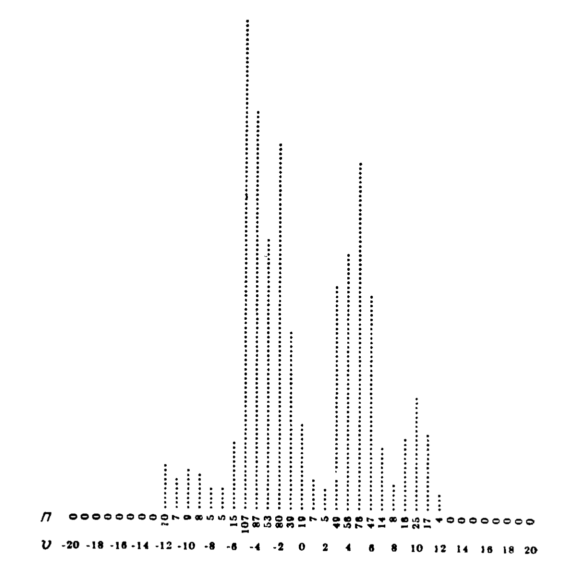


Рис. 16.21. Многоэтапная обработка стереоизображений — гистограмма смещений: n — число точек; v — значение смещения

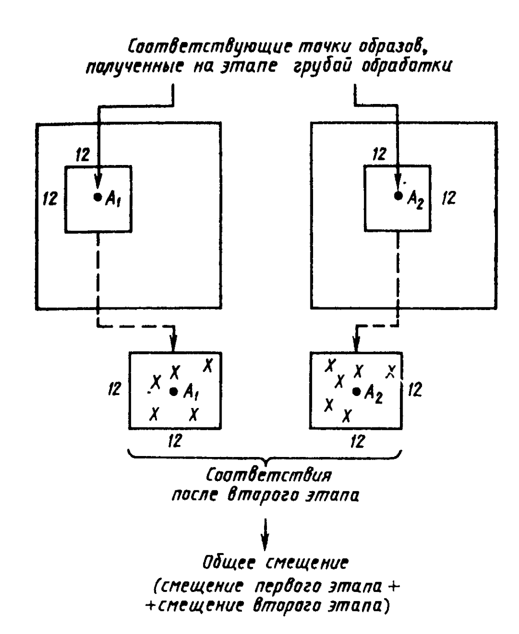


Рис. 16.22. Структура двухэтапной обработки с использованием приближения:
X — пробные точки, полученные на этапе точной обработки

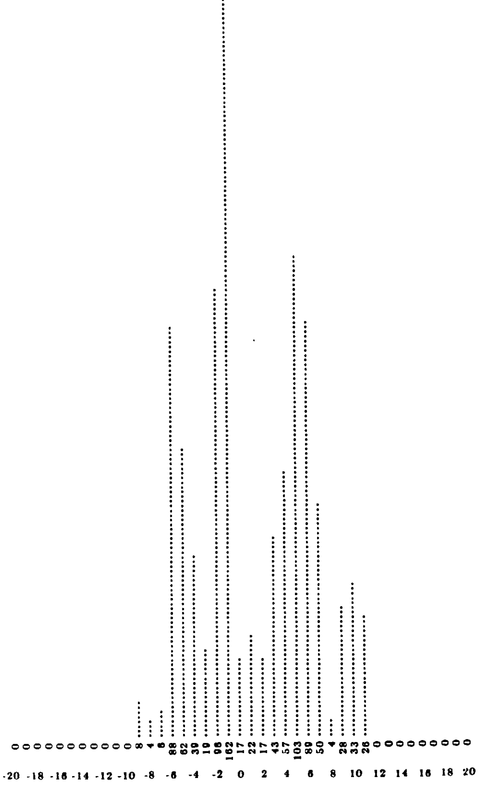


Рис. 16.23. Гистограмма окончательных значений смещений для стереопары изображений.

$w_{2D\text{э}}$, равным 6 элементам, и линии пересечения обработанных этим оператором образов с нулевым уровнем. Перед тем как находить соответствия этим линиям, необходимо осуществить приближение. Способ реализации этой процедуры иллюстрируется рис. 16.22, где изображены два элемента A_1 и A_2, которые после этапа грубой обработки предположительно оцениваются как соответствующие. Вокруг этих элементов строится окрестность размером 12×12 элементов. Внутри этих окрестностей с помощью оператора точной оценки отыскиваются соответствующие точки по описанному алгоритму. К значениям смещения, полученным оператором точной оценки, добавляется значение смещения, определенное по точкам A_1 и A_2 оператором грубой оценки. Гистограмма результирующих смещений приведена на рис. 16.23. Затем получают дальнометрическую карту, на которой более темным элементам соответствует большее расстояние от базовой линии стереосистемы. Адекватность полученной таким способом карты дальностей задачам автоматической интерпретации сцен будет зависеть от того, в какой степени удастся сжать информацию о всей совокупности сцен, в которых предстоит работать роботу.

16.3.3. Алгоритм Барнарда — Томпсона

Для алгоритмов Марра — Поджио — Гримсона (МПГ-алгоритмы), рассмотренных в предыдущем разделе, характерны следующие свойства.

Дискретность: пробные точки, выбранные для отождествления, хорошо различимы, в том смысле, что они представляют собой такие локальные изменения яркостей, которые легко определяются первичным оператором свертки с заданной шириной главного лепестка.

Подобие: при определении соответствия используется некая мера подобия. В МПГ-алгоритме мерой подобия точек в окрестности поиска являлась ориентация линии контура, полученная при нулевом пересечении оператора.

Согласованность: это некая мера непрерывности значений смещения. Поскольку значения смещений могут иметь разрывы только в относительно небольшом числе мест на границах перекрытия для одной из камер, это свойство можно использовать для отсева тех точек, у которых смещение не соответствует общему значению для локального участка. В МПГ-алгоритме согласованность использовалась для различия действительной точки соответствия от ложных при множественном соответствии одной пробной точке.

Алгоритм Барнарда — Томпсона, хотя и обладает всеми перечисленными свойствами (дискретность, подобие, согласованность), использует другие критерии. В соответствии с ним в качестве пробных выбираются только те точки, в которых существенные перепады яркости происходят во всех направлениях. Для выбора точки-кандидата сначала вокруг каждого элемента строится окрестность из 5×5 элементов. Затем в данной точке вычисляются значения перепадов яркости по четырем направлениям: вертикальному, горизонтальному и двум диагональным. Из вычисленных значений запоминается только минимальное, которому дается название первоначальная величина значимости рассматриваемого элемента. Ясно, что большое значение первоначальной значимости подразумевает большие перепады во всех четырех направлениях. Окончательная величина значимости выявляется путем приравнивания к нулю всех начальных величин значимости, кроме тех, которые относятся к локальным максимумам. Таким образом, в качестве значимых признаются только те элементы, на которых не просто возникают большие перепады яркости, но эти перепады больше, чем на всех соседних элементах.

Для установления окончательных величин значимости все первоначальные величины (кроме точек максимумов) были приравнены к нулю. Из всех полученных таким образом пробных точек во всех строках запоминались только те, значения перепадов в которых превышали установленный порог. Значение порога зависит от числа пробных точек, необходимого для определения соответствий.

Наиболее характерной особенностью алгоритма Барнарда — Томпсона является, видимо, способ отождествления точек левого и правого образов. Для нахождения соответствия пробной точке левого образа ее координаты переносятся на правый образ и вокруг полученной точки строится окрестность с размерами $d_{\max} \times d_{\max}$ (рис. 16.24), где $d_{\max}$ — максимально возможное смещение. Все точки, попавшие в окрестность, рассматриваются как вероятные соответствия данной точке левого образа.

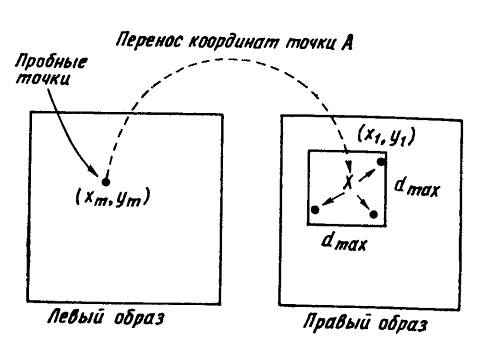


Рис. 16.24. Построение окрестности поиска по методу Барнарда— Томпсона

раза. Обозначим (x_m, y_m) координаты m-й пробной точки левого образа, а (x_i, y_i) — координаты i-й вероятной точки в окне $d_{\max} \times d_{\max}$ (см. рис. 16.24). Этой i-й точке сопоставляется смещение $d \equiv (x_i - x_m, y_i - y_m)$.

Сущность алгоритма заключается в определении вероятности $P_m(d)$ для каждого возможного смещения d, соответствующего m-й пробной точке, в последовательном обновлении этих вероятностей с учетом согласованности и в окончательном выборе той точки, для которой эта вероятность максимальна. Для каждой пробной точки выбирается только одно соответствие, при этом могут оставаться пробные точки, которым вообще не нашлось соответствия. Например, пробные точки левого образа, которые на правом образе оказываются заслоненными, не получат соответствий.

Для установления начальных значений вероятностей различных смещений используется следующая методика. Сначала определяется подобие пробной точки (x_m, y_m) всем вероятным соответствиям в пределах заданного окна (см. рис. 16.24). Подобие устанавливается путем суммирования квадратов разностей между точками в окне 5×5 элементов, построенным вокруг точки (x_m, y_m) левого образа, и точками аналогичного окна, построенного вокруг вероятного элемента правого образа. Обозначим $S_m(d)$ меру такого подобия для смещения d. Заметим, что, чем меньше $S_m(d)$, тем более подобны пробная точка и точка потенциального соответствия. Следовательно, чем меньше $S_m(d)$, тем больше должна быть связанная с ней вероятность $P_m(d)$. Прежде чем построить функцию вероятности, каждой точке (x_m, y_m) назначается набор весовых коэффициентов

$$W_m(d) = \frac{1}{1 + CS_m(d)}, \qquad (16.49)$$

где C — некоторая положительная постоянная величина (Барнард и Томпсон использовали $C = 10$). Достоинством такого способа назначения весов является то, что независимо от значения величины C диапазон их значений лежит в интервале [0,1] и большему значению веса соответствует большая степень подобия. Однако эти весовые коэффициенты не могут непосредственно использоваться для определения вероятности, поскольку, во-первых, их сумма не равна единице, а, во-вторых, они прямо не отражают вероятность не установить соответствия.

Для того чтобы преобразовать эти весовые коэффициенты в значения вероятностей, оценим сначала вероятность не установления соответствия. Обозначим особым знаком d^* отсутствующее смещение (отсутствие соответствия) и через $P_m(d^*)$ — вероятность этого соответствия. Используем индекс 0 для обозначения начальных значений этой и других вероятностей, т. е. значений, определенных до корректировки по критерию согласованности

$$P_m^0(d^*) = 1 - \max\left[W_m(d)\right]. \quad (16.50)$$

Смысл этой формулы заключается в том, что наибольшее значение $W_m(d)$ принадлежит, скорее всего, действительному соответствию, тогда правая часть уравнения определяет вероятность не найти соответствия. В таком пояснении имеется, безусловно, элемент натяжки, однако в отсутствие строгого подхода можно удовлетвориться и таким выводом P_m^0.

Определив $P_m^0(d^*)$, можно оценивать значения вероятностей для других смещений с использованием байесовского подхода:

$$P_m^0(d) = P_m(d \mid m)\left[1 - P_m^0(d^*)\right],\ d \neq d^*, \quad (16.51)$$

где $P_m(d|m)$ — условная вероятность того, что смещение точки (x_m, y_m) равняется d при условии, что у данной точки имеется кандидат на соответствие; $\left[1 - P_m^0(d^*)\right]$ — вероятность того, что у данной точки найдутся кандидаты на соответствие.

Условная вероятность оценивается по следующей формуле:

$$P_m^0(d \mid m) = \frac{W_m(d)}{\sum\limits_{d' \neq d^*} W(d')}. \quad (16.52)$$

Из такого определения вероятностей вытекает одно важное следствие. Если подставить оценку условных плотностей вероятностей в уравнение (16.51), то легко показать, что с мма вероятностей всех смещений для (x_m, y_m), включая вероятность не найти соответствия, будет равна единице.

Полученные вероятности корректируются с помощью согласованности. Найденные начальные вероятности зависят только от ближайших соседей сравниваемых элементов. На этом этапе вероятности смещений, которые часто встречаются в ближайшей окрестности, увеличивают, а редко встречающихся — уменьшают. С учетом эффектов дискретизации необходимо определить, что понимается под подобием смещений. Два смещения d и d' считаются подобными, если выполняется условие

$$\max\left(\left|d_x - d_x'\right|,\ \left|d_y - d_y'\right|\right) \leqslant 1, \quad (16.53)$$

которое определяет, что если ни одна из составляющих смещений (по осям x и y) не отличается более чем на 1 элемент, то такие смещения одинаковы. Для того, чтобы вычислить новые вероятности смещений для (x_m, y_m), исследуются значения смещений для соседних пробных точек левого образа. Затем увеличивают значения вероятностей тем смещениям, которые наиболее часто встречаются в некоторой области, и уменьшаются вероятности других смещений. Для пояснения этой процедуры предположим, что критерий согласованности применялся k раз, в результате чего получены вероятности $P_m^k(d)$. На очередном шаге применения этого критерия получаем вновь скорректированные вероятности $P_m^{k+1}(d)$. Новый набор вероятностей получают путем анализа смещений для всех пробных точек левого образа в области $R \times R$ элементов от (x_m, y_m). В работе [5] Барнард и Томпсон использовали $R = 15$ элементов. Для каждой пробной точки (x_m, y_m) этой области вычисляются суммы следующего вида:

$$Q_m^k(d) = \sum_{\substack{n \in [R \times R] \\ n \neq m}} P_n^k(d) \quad d \neq d^*, \quad (16.54)$$

где суммирование «по всем n из $[R \times R]$» означает все пробные точки левого образа, расположенные в области $[R \times R]$ элементов вокруг (x_m, y_m); $n \neq m$ означает, что в сумму не включается смещение для точки (x_m, y_m). Поскольку все смещения, удовлетворяющие критерию (16.53), считаются подобными, в практической реализации в аргумент суммирования включаются и все подобные смещения для каждой пробной точки (x_n, y_n).

Величина $Q_m^k(d)$ является мерой согласованности смещения d со всеми другими смещениями точек в некоторой окрестности вокруг (x_m, y_m). Если $Q_m^k(d)$ равна нулю, это означает, что у других пробных точек в ближайшей окрестности смещение d не встречается. Большое значение $Q_m^k(d)$ означает, что поблизости от данной точки имеется еще несколько пробных соответствий, имеющих одинаковое смещение.

Далее мера согласованности $Q_m^k(d)$ используется для корректировки набора вероятностей $P_m^k(d)$ и получения нового набора $P_m^{k+1}(d)$. Для этого сначала генерируется ненормированный ряд чисел

$$\hat{P}_m^{k+1}(d) = \left(A + BQ_m^k(d)\right) P_m^k(d) \quad d \neq d^* \quad (16.55)$$

и

$$\hat{P}_m^{k+1}(d^*) = P_m^k(d^*). \quad (16.56)$$

Новые значения вероятностей получают нормированием:

$$P_m^{k+1}(d) = \frac{\hat{P}_m^{k+1}(d)}{\sum\limits_{d} \hat{P}_m^{k+1}(d)}. \quad (16.57)$$

Выбор коэффициентов A и B играет существенную роль, так как они определяют, на сколько мера согласованности изменит вероятности смещений для точки (x_m, y_m). Если коэффициент A не равен нулю, то нулевое значение меры согласованности для конкретного смещения не приведет к установлению новой вероятности этого смещения равной нулю. Это условие является необходимым, поскольку по мере последовательной корректировки вероятностей учитывается информация от все более удаленных от (x_m, y_m) пробных точек, и она может вызвать появление не равной нулю меры согласованности для конкретного смещения. В свою очередь, коэффициент B определяет степень влияния данного значения меры согласованности на вероятности смещений. Следует отметить, что на вероятность не найти соответствие для точки (x_m, y_m), т. е. на вероятность смещения d^*, влияет только нормализация согласно выражению (16.57).

Для повышения вычислительной эффективности алгоритма при значениях вероятности смещения менее 0,1 она приравнивается к нулю. Если в результате описанного процесса пробная точка (x_m, y_m) теряет все потенциальные соответствия, она объявляется несогласующейся, т. е. устанавливается вероятность $P_m(d^*) = 1$. Несмотря на то что описанная процедура должна повторяться до тех пор, пока вероятности не достигнут установившихся значений, можно произвольным образом прекратить ее после, например, 10 итераций, при этом те пробные точки, которые имеют вероятности смещений 0,7 или больше, считаются отождествленными. Все остальные пробные точки считаются неотождествленными.

Затем производят последовательную корректировку начальных значений вероятностей смещений на основе свойства согласованности с учетом принятых критериев окончательного отклонения или принятия гипотезы по вероятностям. После 10 итераций пробные точки, все еще обладавшие множественными соответствиями, считались неотождествленными и корректировка прекращалась.

16.3.4. Алгоритм Бейкера — Бинфорда

Оба рассмотренных выше алгоритма анализа сцен требуют поиска границ, так как пробные точки, с помощью которых определяется соответствие, выбираются в местах изменения яркостей образа. Такое представление не применялось в большинстве известных ранее алгоритмов анализа стереообразов, которые использовались в основном для топографической расшифровки аэрофотоснимков по изогипсам. Они были основаны на обработке некоторых областей образов. В соответствии с этими алгоритмами выбранным последовательностям окон (как правило, размером 10×10 элементов) левого образа путем нахождения взаимной корреляции ставились в соответствие окна правого образа [15, 37]. Вычисленные по координатам центров соответствующих окон значения смещений приписывались центральным элементам левого образа. (Иногда вместо взаимной корреляции использовались более простые с вычислительной точки зрения алгоритмы определения соответствия на основе суммы квадратов разностей; однако за это приходилось платить возрастанием чувствительности к разнице в контрастах левого и правого образов.)

Алгоритмы обработки стереообразов, основанные на анализе площадей, базируются на предпосылке, что соответствующие области левого и правого образов имеют идентичные изменения яркостей, т. е. обладают свойством так называемой фотометрической инвариантности. Такое предположение оправдано в фотограмметрии, где изображения соответствуют преимущественно постепенным изменениям высоты земных поверхностей. Однако вблизи резких изменений дальности предметов на изображении, которые характерны для сцен в робототехнике, условие фотометрической инва-

риантности не выполняется, поскольку в окрестности такого перепада возникает явление перекрывания некоторых областей левого изображения на правом, и наоборот. С другой стороны, алгоритмы обработки стереообразов, основанные на анализе границ, базируются на предпосылке, что образы топологически инвариантны. Это означает, что при сканировании в любом направлении как левого, так и правого образов границы пересекаются в одной и той же последовательности (хотя из-за явления перекрывания не всем границам левого образа могут найтись соответствия на правом, и наоборот). Вследствие различия в исходных предпосылках алгоритмы, основывающиеся на идентификации границ, хорошо работают в условиях, когда корреляционные алгоритмы работают плохо, и наоборот.

Несмотря на то что алгоритмы поиска границ не обеспечивают построение дальнометрических карт для всех точек сцены, они обладают тем достоинством, что позволяют определять местоположение границ с точностью до долей элемента. Изменение яркости образа на месте границы соответствует пересечению с нулевым уровнем преобразования Лапласа от изображения. Нулевое пересечение предполагает изменение знака оператора при переходе с одного элемента на другой. Интерполяция между соседними элементами обеспечивает точность определения границ в доли элемента. (Аналогичное свойство человеческого зрения является причиной его высокой разрешающей способности. Оно заключается в способности определять положение предмета на изображении с точностью порядка 5 угловых секунд, тогда как разрешающая способность рецепторов в зоне фовеа составляет около 0,4 угловых минуты. В работе [13] доказывается, что такая «сверхвысота» зрения и возможность различать объекты с точностью, превышающей разрешающую способность рецепторов, достигается за счет интерполяции.) Алгоритмы обработки площадей не позволяют достичь субэлементной точности. Точность, с которой можно определить смещение этими методами, гораздо ниже и она обратно пропорциональна размерам окон, используемых для идентификации. Однако с помощью методов анализа площадей получают информацию о дальности по гораздо большему числу точек сцены, чем в методах анализа границ.

Алгоритм Бинфорда — Бейкера [3] объединяет идеи методов анализа границ и площадей и позволяет определять смещение практически любой точки. Первая часть алгоритма устанавливает соответствие между границами в образах. Границы описывают основные конфигурации сцены и обеспечивают измерение смещения по нескольким разбросанным точкам. Вторая часть алгоритма обеспечивает более полное и детальное измерение с помощью корреляции по яркости, используя для локального приближения информацию, полученную первой частью алгоритма. Для того, чтобы облегчить задачу нахождения соответствий яркостного рельефа для не нашедшей пары границы, обработка производится пофрагментно путем определения ее местоположения на каждой строке развертки между уже идентифицированными границами, найденными в первой части алгоритма. Найденные таким способом соответствия заполняют пропуски, образовавшиеся после выполнения первой части алгоритма.

Для повышения помехоустойчивости и эффективности при сопоставлении границ в первой части алгоритма анализ сцен производится с двумя степенями детализации. Последовательное применение грубого, а затем точного анализа напоминает многоэтапную процедуру МПГ-алгоритма и на первом этапе заключается в низкочастотной фильтрации образов и согласовании границ в расфокусированных образах с низкой разрешающей способностью, а на втором этапе — в использовании полученных на первом этапе значений смещений для уточнения положения границ. При нахождении соответствий в расфокусированных образах на каждой строке точки, принадлежащие границам, характеризуются уровнями яркости по обеим сторонам границы, знаком контраста и наклоном отрезка границы. При проведении процедуры сопоставления по алгоритму Витерби, каждый из названных признаков подвергается взвешиванию по линейному закону. На этапе уточнения положения границ используется аналогичная процедура, однако при этом в качестве признаков учитываются дополнительные углы локальной ориентации границ и локальные смещения, вычисленные на первом этапе по расфокусированным образам.

Очевидно, что рассматриваемый алгоритм обладает свойствами дискретности и подобия, упомянутыми в предыдущем разделе. Однако остается неясным, каким образом обеспечивается свойство согласованности. Отметим, что корреляция границ в образах определяется для каждой строки отдельно. Иными словами, для определения корреляции локальной границы на строке используются только соответствующие строки левого и правого образов. (Если базовая линия стереосистемы параллельна горизонтальной плоскости, то строки сканирования образа также параллельны горизонтали. В общем случае строки двух образов

стереопары, содержащие соответствующие точки границ, попадают на так называемую эпиполярную линию, которая представляет собой проекцию базовой линии системы на общую плоскость, содержащую как левый, так и правый образы.) Для определения связности границ используются соседние строки, по которым устраняют соответствия, нарушающие непрерывность поверхностей объектов. Ограничение, накладываемое требованием связности границ, выражается в том, что связная последовательность локальных границ на одном образе должна быть видна как связная последовательность и на другом образе и что ограниченная его поверхность может представлять собой либо непрерывную часть некоторой детали объекта, либо его внешний контур.

16.4. Лазерные датчики

Принцип действия лазерного датчика (рис. 16.25, *а*) заключается в том, что объект освещается сфокусированным лучом, а отраженный луч, примерно соосный с излучаемым, воспринимается приемником. Дальность определяется по промежутку времени, требуемому для распространения луча до объекта и обратно. Дальнометрическая карта формируется сканированием светового луча по сцене. Отражающая способность каждой точки объекта оценивается по интенсивности отраженного света.

Одним из способов прямого измерения временной задержки является измерение импульсного сигнала при его распространении до объекта и обратно [9, 20]. Поскольку свет распространяется со скоростью около 30 см/нс, то разрешающая способность системы непосредственного измерения должна составлять порядка 50 пс для точности измерения дальности около 6,5 мм. В измерительной системе [20] достигнута точность 20 мм в диапазоне измерения 1—3 м при времени сканирования сцены 3 мин с разрешающей способностью 128×128 элементов.

Временная задержка может быть определена методом низкочастотной модуляции непрерывного лазерного излучения и измерения разности фаз между излученным и отраженным сигналами [30]. В данном разделе рассматриваются принципы функционирования лазерных датчиков и ограничения диапазона измеряемых дальностей на примере именно такой системы. Функциональная схема системы приведена на рис. 16.25, *б*. Плоскополяризованная волна с выхода гелий-неонового лазера (мощностью 15 мВт и длиной волны 632,8 нм) модулируется по амплитуде сигналом частотой 9 МГц при пропускании через кристалл двуокиси фосфата аммония. Модуляция осуществляется за счет вращения плоскости поляризации. После этого луч разделяется на 2 составляющих спектральной призмой. Ответственный луч используется в качестве сигнала опорной фазы, а также для автоматической регулировки усиления. Прямой луч, имеющий среднюю мощность около 6 мВт, отклоняется сканирующим зеркалом и освещает объект. Для уменьшения воздействия внешней засветки отраженный от объекта луч пропускают через интерференционный фильтр с полосой пропускания около 2 нм. С выхода интерференционного фильтра луч поступает на вход фотоумножителя, с выхода которого попадает на фильтр частоты 9 МГц. Выходной сигнал фильтра используется для амплитудных и фазовых измерений.

Типовым недостатком лазерных дальнометрических систем является значительное время, требующееся для построения полной карты дальностей. Основной причиной этого является малая интенсивность отраженного от объекта светового луча. Уменьшить этот недостаток можно путем увеличения мощности лазера, но это нежелательно по соображениям безопасности. Для выяснения причин низкого быстродействия систем рассмотрим явления, происходящие при отражении световых лучей от зеркальных и матовых поверхностей. Затем приведем выражения, полученные в работе [30], для ожидаемого стандартного отклонения при измерении дальности и его зависимость от реальных значений отношения сигнал/шум.

Рассмотрим падающий на некоторую поверхность сфокусированный лазерный луч (рис. 16.26, *а*), составляющий с нормалью к плоскости угол θ_i. Часть света будет поглощена объектом, а часть — рассеяна. В отраженном свете можно выделить 2 составляющих, различных по своим свойствам. Одна представляет собой зеркально отраженный луч, подчиняющийся хорошо известному закону равенства углов падения и отражения. Вторая составляющая (более важная для СТЗ) представляет собой так называемое диффузное отражение. Отношение мощностей зеркальной и диффузной составляющих зависит от шероховатости поверхности объекта (степень пропорциональности зависит от длины волны падающего света, которая для гелий-неоновых лазеров составляет около 0,6 мкм). Как показано на рис. 16.25, *а*, в лазерных дальномерах отраженный луч, попадающий в датчик, почти соосен с падающим лучом. Следовательно, воспринимаемый датчиком световой поток является частью диффузной составляющей во всех случаях, кроме тех, когда поверхность объекта перпендикулярна к

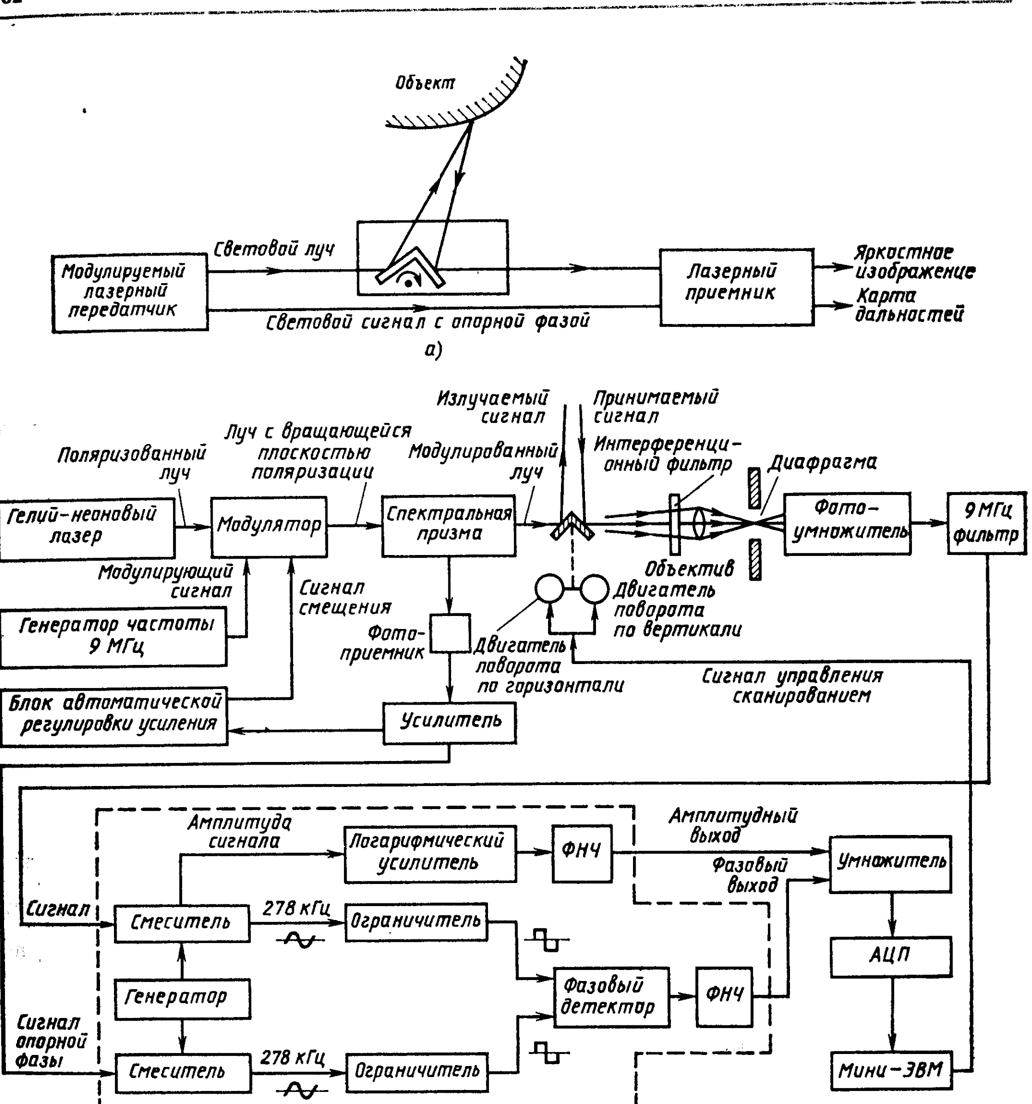


Рис. 16.25. Лазерные датчики:

а — принцип действия лазерного датчика; *б* — функциональная схема лазерной дальнометрической системы [30]

лучу и в датчик попадает зеркальная составляющая. Какова зависимость интенсивности диффузно отраженной составляющей от ориентации поверхности относительно падающего луча? На этот вопрос дает ответ закон Ламберта, который будет сформулирован после введения некоторых определений.

Интенсивность светового луча можно охарактеризовать зависимостью усредненной по времени мощности, падающей на единичную площадку (Вт/см²), при условии, что она перпендикулярна направлению распространения светового луча. Энергетической характеристикой хорошо сфокусированного светового луча является поток лучистой энергии, представляющий собой энергию (в ваттах), переносимую лучом за единицу времени через собственное поперечное сечение. Интенсивность диффузно

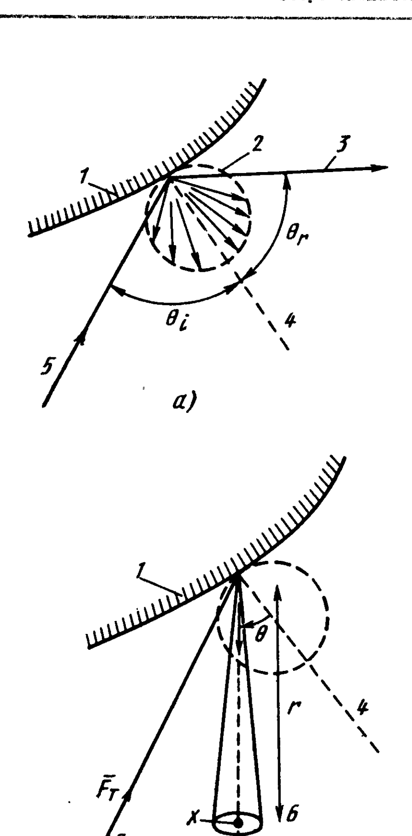


Рис. 16.26. Принцип лазерного измерения дальности:

а — формирование зеркального и диффузного отражения; б — формирование отраженного луча; 1 — объект; 2 — диффузное отражение; 3 — зеркальное отражение; 4 — нормаль к поверхности; 5 — лазерный луч; 6 — площадка; 7 — отраженный луч

отраженного света (по определению несфокусированного) определяется силой света, представляющей собой световой поток, распределенный в единице телесного угла. На рис. 16.26, *б* изображен телесный угол $d\Omega$, направленный под углом θ к нормали. Если полный световой поток измеряется как мощность dP_d лучистой энергии в данном телесном углу, то сила света (Вт/стерадиан) в точке X будет выражаться формулой

$$I_d = \frac{dP_d}{d\Omega}. \qquad (16.58)$$

Закон Ламберта устанавливает следующую зависимость силы света от угла диффузного отражения:

$$\overline{I}_d = \frac{1}{\pi} \overline{F}_T \rho_d \cos\theta, \qquad (16.59)$$

где ρ_d — удельное диффузное рассеяние поверхности, равное отношению общей мощности, переносимой с помощью механизма диффузного отражения по всем телесным углам к величине F_T; F_T — общий световой поток падающего луча. Значение коэффициента ρ_d изменяется от 0 для абсолютно черной поверхности до 1 для абсолютно отражающей поверхности. Кроме того, оно зависит от длины волны падающего света.

Несмотря на то что в соответствии с законом Ламберта диффузное отражение не зависит от угла падения светового луча, для работы датчика важно только обратное отражение (см. рис. 16.25, *а*), т. е. отражение в направлении, почти совпадающем с направлением падающего луча. Таким образом, если θ_i есть угол между падающим лучом и нормалью к поверхности, то интенсивность обратного отражения будет зависеть от $\cos\theta_i$ — угла наклона поверхности.

Кроме отмеченных зависимостей отраженного светового потока от шероховатости поверхности и ее ориентации, его величина, принятая чувствительным датчиком, зависит от расстояния до поверхности. Пусть A_R — эффективная площадь фотоприемника, принимающего отраженный свет, и пусть r — расстояние до точки отражения. Тогда телесный угол, отсчитываемый от данной точки объекта и соответствующий воспринимающей площади датчика, будет равен A_R/r^2. Значение общего светового потока, получаемое датчиком, будет выражено следующей формулой:

$$\overline{F}_p = \frac{\alpha A_R \overline{F}_T \rho_d \cos\theta_i}{\pi r^2}. \qquad (16.60)$$

Коэффициент α в данной формуле учитывает влияние узкополосного интерференционного фильтра, необходимого для подавления внешней засветки. Одновременно этот фильтр в некоторой степени ослабляет и отраженный от объекта свет.

Поскольку падающий на объект луч модулируется по амплитуде, мощность излучения при этом записывается в виде

$$F_T(t) = \overline{F}_T(1 + m\cos\omega_m t). \qquad (16.61)$$

При наличии модуляции мощность отраженного излучения принимает вид

$$F_p(t) = \overline{F}_p[1 + m\cos(\omega_m t - \varphi)], \qquad (16.62)$$

где усредненный поток лучистой энергии $\overline{F}_p$ задается уравнением (16.60), а сдвиг

фаз φ выражается формулой

$$\varphi = \frac{\omega_m}{c}(2r + r_0), \qquad (16.63)$$

где расстояние r_0 соответствует набегу фазы внутри датчика.

Сдвиг фазы модулирующего сигнала возникает из-за распространения луча на расстояние r до объекта и обратно, поэтому измерение указанного сдвига фаз дает непосредственно информацию о дальности.

Точность измерения дальности зависит от точности измерения фазового сдвига. Какой минимальный сдвиг способен измерить чувствительный датчик? Из вышеприведенной формулы следует, что изменение дальности на 1 см приводит к сдвигу фазы на 0,2°. В работе [25] показано, что можно получить точность измерения фазового сдвига 0,1°. Однако для заданного диапазона дальностей сложно реализовать такую точность. Заметим, что принимаемый сигнал является функцией величины $\rho_d \cos\theta/r^2$. Если принять диапазон изменения ρ_d равным 0,2—1, дальности 1—5 м, угла падения луча 0—87°, получим динамический диапазон изменения $\rho_d \cos\theta/r^2$ от 1 до 25 000 (88 дБ). Когда принимаемый сигнал находится в нижней части динамического диапазона и становится сравнимым с уровнем шумов, точное измерение фазы становится невозможным. Ниже рассматриваются источники шума и реальные значения отношения сигнал/шум.

Когда темный объект находится на значительном расстоянии и рассматривается под острым углом, величина $\rho_d \cos\theta/r^2$ мала, а, следовательно, мощность принимаемого сигнала падает. При малых уровнях мощности в фотоумножителях преобладают квантовые шумы электронной эмиссии. Получающиеся при этом значения отношения сигнал/шум можно оценить следующим образом. В фотоумножителях первичные электроны эмитируют при поглощении фотонов света. Если интервал наблюдения равен T, то усредненный световой поток, определяемый уравнением (16.60), выражается через усредненное число фотонов $\bar{n}$ следующим образом:

$$\bar{n} = \frac{\bar{F}_p T}{hc/\lambda}. \qquad (16.64)$$

Величина hc/λ представляет собой энергию одного фотона, где h — постоянная Планка, c — скорость света, λ — длина волны падающего луча. Обозначим квантовую эффективность фотоумножителя η. Тогда число эмитируемых электронов выразится формулой

$$\bar{n}_e = \eta\bar{n}. \qquad (16.65)$$

Поскольку процесс эмитирования электронов подчиняется распределению Пуассона, стандартное отклонение σ_e числа электронов будет равно $\sqrt{\bar{n}_e}$. Тогда с учетом уравнения (16.60) отношение сигнал/шум (СШ) на выходе фотоумножителя будет выражено следующими формулами:

$$\text{СШ} = \bar{n}_e/\sigma_e = \sqrt{\bar{n}_e}; \qquad (16.66)$$

$$\text{СШ} = \left[\frac{\alpha\eta\lambda A_R F_T T}{\pi hc}\,\frac{\rho_d \cos\theta_i}{r^2}\right]^{1/2}. \qquad (16.67)$$

При измерении сдвига фазы по слабым сигналам приходится учитывать влияние квантовых шумов. В работе [30] показано, что из-за наличия шума ошибка в определении сдвига фазы дает следующую погрешность измерения дальности:

$$\sigma_r \cong \frac{c}{\sqrt{2}\,m\omega_m\text{СШ}} = \frac{1}{2\sqrt{2}\,\pi}\,\frac{\lambda_m}{m\,\text{СШ}}, \qquad (16.68)$$

где σ_r — стандартное отклонение погрешности измерения дальности определяется по формуле

$$\lambda_m = \frac{2\pi c}{\omega_m}. \qquad (16.69)$$

Подставляя (16.67) в (16.68), получим для стандартного отклонения погрешности измерения дальности:

$$\sigma_r \cong \frac{\lambda_m}{m}\left[\frac{hc}{8\pi\alpha\eta\lambda A_R F_T T}\,\frac{r^2}{\rho_d \cos\theta_i}\right]^{1/2}. \qquad (16.70)$$

Это уравнение показывает, каким образом погрешность измерения дальности зависит от параметров системы. В табл. 16.2 приведены результаты, полученные по приведенным уравнениям для случаев малых и средних сигналов [30]. (Мощность сигнала определяется параметрами ρ_d, θ_i, r.) Даже при отношении сигнал/шум порядка 40 дБ погрешность определения дальности составляет около 4 см. Несмотря на то что с повышением отношения сигнал/шум точность измерения дальности существенно возрастает, результаты, предсказанные по приведенным формулам, оказываются даже несколько завышенными. Это объясняется тем, что при больших уровнях сигналов преобладающим типом шумов, ограничивающих разрешающую способность по дальности, становятся уже не квантовые шумы. (Среди других источников шумов следует отметить лазерный шум, внешнюю засветку, шум темнового тока и т. д.) В работе [30] показано, что с помощью адаптивного сглаживания за счет увеличения времени обзора разрешающую способность по дальности для всех сигналов можно привести к приемлемым уровням. Поскольку при этом увеличивается время обзора и построения полной дальномерной карты, то может оказаться необходимым осуществлять коррекцию дрейфа параметров. Такая коррекция производится с помощью калибровки лазерного дальномера по опорным маркерам, находящимся на известном удалении от него.

16.2. Характеристики лазерной системы фирмы «Нитцан» и результаты вычислений параметров сигналов

Характеристики системы	Измеряемые параметры	При малой интенсивности сигнала	При средней интеисивиости сигнала
$\bar{F}_T = 6\times10^{-3}$ [Вт]	ρ_d	0,02	0,3
$\lambda = 0{,}6328\times10^{-6}$ [м]	θ [градус]	87	45
$\lambda_m = 33{,}3$ [м]	r [м]	5	3
$m = 1{,}0$	$\bar{F}_p$ [Вт]	$3\cdot10^{-12}$	$1{,}7\cdot10^{-9}$
$A_R = 1{,}5\times10^{-4}$ [м²]	$\bar{n}_{pe}$ [число фотоэлектронов]	10^4	$5\cdot10^6$
$\alpha = 0{,}25$			
$\eta = 0{,}1$	СШ [раз/дБ]	100 (40)	2300 (67)
$T = 0{,}01$ [с]	σ_r [см]	4	0,2

16.5. Ультразвуковые датчики

Ультразвуковые датчики завоевали популярность после того, как фирма «Поляроид» использовала их в фотокамерах с автоматической наводкой на резкость. Они работают по тому же принципу измерения временной задержки, что и лазерные дальномеры, рассмотренные в предыдущем разделе. Импульс, состоящий из 5—10 периодов синусоидальных ультразвуковых колебаний, излучается в направлении к объекту преобразователем, который работает в режиме приемопередатчика. Время, требуемое для распространения импульса до объекта и обратно, пропорционально его удаленности. Поскольку звук распространяется с гораздо меньшей скоростью, чем свет, в ультразвуковых дальномерах существенно легче реализовать импульсный метод непосредственного измерения дальности (с использованием коротких акустических импульсов), чем косвенный метод амплитудной модуляции (применяемой в лазерных системах).

Метод посылки звукового импульса и измерения времени прихода отраженного от объекта сигнала (рис. 16.27, *а*) носит название эхо-импульсного метода. В эхо-импульсном методе дальнометрическая карта формируется с помощью механического сканирования преобразователем (рис. 16.27, *а*) и регистрации значений дальности для каждого его положения.

Ультразвуковые датчики работают на частотах от 50 до 200 кГц. Для рационального выбора рабочей частоты необходимо учитывать свойства датчиков этого типа. Первое состоит в том, что с уменьшением генерируемой частоты увеличивается рассеивание луча, посылаемого датчиком сигнала. На рис. 16.27, *б* представлена диаграмма направленности ультразвукового дальномера фирмы «Поляроид» с рабочей частотой 50 кГц. Ширина главного лепестка диаграммы составляет около 30°. Если предположить, что к преобразователю, выполненному в виде кругового излучателя радиусом a, прикладывается равномерное давление, то соотношение между рабочей частотой и шириной главного лепестка (ШГЛ) задается выражением

$$\text{ШГЛ} = 2\arcsin\frac{0{,}61\lambda}{a}, \qquad (16.71)$$

где $\lambda = V_s/f$ — длина волны звука в воздухе; V_s — скорость распространения звука в воздухе (при 20 °С она равна примерно 343 м/с); f — рабочая частота. Второе свойство ультразвуковых датчиков состоит в том, что с увеличением рабочей частоты растет затухание акустической волны в воздухе. Затухание (ЗТХ) плоской акустической волны, распространяющейся в воздухе в направлении x, определяется формулой

$$\text{ЗТХ} = \exp(-\alpha x),$$

где коэффициент затухания α задается выражением

$$\alpha = 1{,}37\cdot10^{-11}f^2 [\text{непер/м}]. \qquad (16.72)$$

Заметим, что коэффициент α пропорционален квадрату частоты. На частоте 50 кГц затухание, вычисленное по данной формуле, еще пренебрежимо мало и составляет $34{,}2\cdot10^{-3}$ непер/м, что соответствует 0,29 дБ/м. (Для перевода из неперов в децибелы используется коэффициент 8,7.) Однако уже на частоте 200 кГц затухание более значительно и составляет 0,548 непер/м, или 4,8 дБ/м, а на частоте 1 МГц оно уже превышает 100 дБ/м. Полученные значения затухания для эхо-импульсного метода должны быть удвоены, поскольку сигнал дважды проходит заданное расстояние.

В низкочастотной части рабочего диапазона, где затухание при распространении

Объект
Отраженный ультразвуковой сигнал
Излученный ультразвуковой сигнал
Кристалл
Направление сканирования
Направление сканирования
Переключатель: прием/передача
Стробируемый генератор гармонических колебаний
Измеритель задержки
Триггер
Дальность
а)
0
330°
30°
300°
60°
270°
90°
0 10 30 50 70 0
0 70 50 30 10 0
б)

Рис. 16.27. Эхо-импульсный метод ультразвуковой дальнометрии:
а — структурная схема метода; *б* — диаграмма направленности ультразвукового дальномера фирмы «Поляроид» на частоте 50 кГц

сказывается не столь существенно, чувствительность системы определяется в основном дифракционными потерями. Под дифракционными потерями понимается ослабление полезного акустического сигнала, возникающее из-за пространственного излучения в широком телесном угле, соответствующем ширине диаграммы направленности (см. рис. 16.27, *б*). Однако в этой части частотного диапазона важнее то, что большая ширина луча вызывает значительное ухудшение разрешающей способности датчика в направлении сканирования. Под разрешающей способностью в направлении сканирования понимается способность датчика различать детали объектов (см. рис. 16.27, *а*). Следовательно, при выборе рабочей частоты датчика необходимо учитывать оба фактора и находить приемлемый компромисс между ухудшением разрешающей способности в низкочастотном участке спектра рабочих частот и увеличением затухания при распространении для высокочастотного участка спектра.

Повышение разрешающей способности в направлении сканирования методом синхронного детектирования и обратного восстановления. Боковое разрешение можно существенно улучшить (а для объектов простой формы даже приблизиться к дифракционным пределам), пользуясь двумя датчиками (рис. 16.28). Один преобразователь, работающий в режиме передачи, облучает объект акустическими волнами, а другой преобразователь в режиме приема

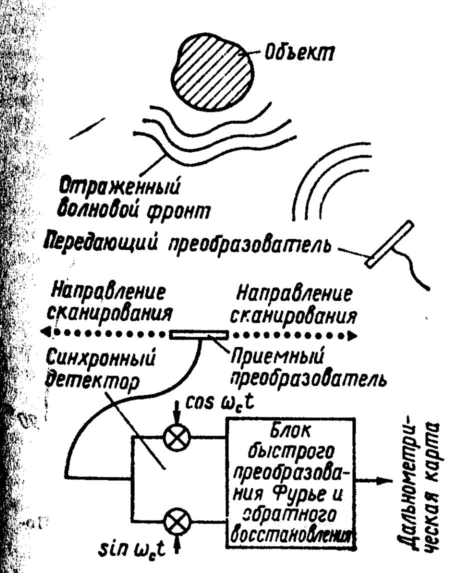


Рис. 16.28. Схема измерения дальности с двумя преобразователями

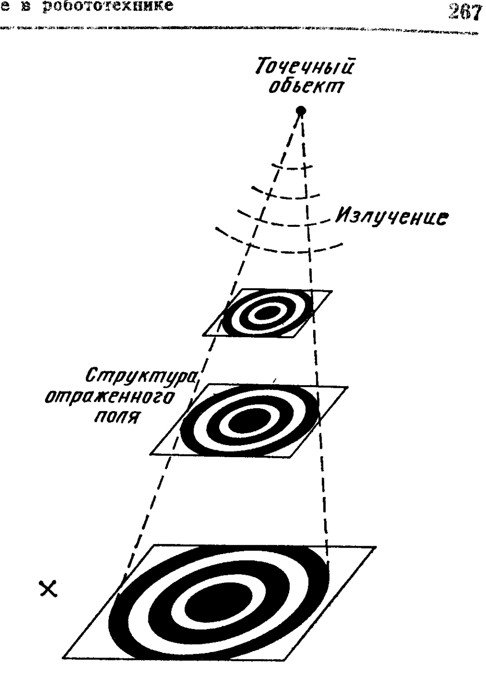


Рис. 16.29. К методу обратного восстановления

измеряет амплитуду и фазу отраженной от объекта волны в плоскости сканирования. Полученные данные позволяют восстановить волновые фронты поля, рассеиваемого объектом в плоскости сканирования.

Методика улучшения бокового разрешения основывается на понятии обратного восстановления на объекте измеренного на расстоянии волнового фронта. Для пояснения понятия обратного восстановления фронта рассмотрим одиночный точечный объект (рис. 16.29), облучаемый плоской волной. Отраженное от объекта поле формирует сферический волновой фронт. Если это поле измерить в нескольких плоскостях, то действительная и мнимая части колебаний будут отражать структуру поля, представленную на рисунке. Рис. 16.29 отражает картину прямого распространения поля от точечного объекта к измерителю. Идея обратного восстановления заключается в определении конфигурации поля в некоторой плоскости × (см. рис. 16.29) и последующем прослеживании его в направлении к объекту. Если удастся восстановить структуру поля, то определить местоположение точечного объекта не составит труда — он находится в точке поля с максимальной напряженностью. Сложный объект можно представить (по крайней мере, теоретически) как суперпозицию множества

точечных объектов, и поскольку процесс обратного восстановления линеен, то реконструкция объекта теоретически возможна. Практически же всю трехмерную структуру объекта реконструировать невозможно (предполагая, что акустические волны проникают и внутрь него), поскольку сложно учесть затухание волн в материале и эффект взаимодействия отражений от различных точек объекта. Тем не менее в принципе возможно восстановление поверхностей объектов, хотя определить степень сложности восстанавливаемых форм пока не удается.

Процедура обратного восстановления может быть достаточно просто реализована на ЭВМ с помощью быстрого преобразования Фурье. Волновые поля, измеренные в плоскости сканирования, подвергаются быстрому преобразованию Фурье, в результате чего получают так называемое спектральное разложение по плоским волнам. Иными словами, измеренное поле представляется суммой плоских волн. (Для плоской волны поверхности равной фазы представляют собой плоскости. Чтобы представить возможную реализацию плоских волн, можно вообразить некий гигантский поршень, перемещающийся возвратно-поступательно и возбуждающий тем самым плоские акустические волны в пространстве.) Необходимость разложения именно на плоские волны определяется тем, что для них точно известны законы прямого и обратного распространения (амплитуда волны умножается на фазовый множитель, называемый передаточной функцией распространения). Следовательно, для того, чтобы реализовать обратное восстановление измеренного волнового фронта на некоторое расстояние, его спектральное разложение по плоским волнам следует домножить на передаточную функцию, соответствующую этому расстоянию. Пусть $g(x, y; z_0)$ — волновое поле, зависящее от координат (x, y) в некоторой плоскости $z = z_0$. Обозначим $G(u, v)$ двухмерное преобразование этого поля:

$$G(u, v) = \int\int g(x, y; z_0) \times \exp[-j2\pi(ux + vy)]dx\, dy, \quad (16.73)$$

где u и v — пространственные частоты соответственно по осям x и y. Для обратного восстановления поля из плоскости z_0 в плоскость z_1 функцию $G(u, v)$ сначала следует умножить на передаточную функцию вида:

$$\exp\left(-j2\pi\frac{z_1 - z_0}{\lambda}\sqrt{1-(\lambda u)^2 - (\lambda v)^2}\right), \quad (16.74)$$

где λ — длина волны акустического поля. Для того, чтобы восстановить картину поля в плоскости $z = z_1$, необходимо выполнить обратное преобразование полученного произведения. Все преобразования Фурье в ЭВМ выполняются по алгоритмам быстрых преобразований. В соответствии с рассмотренной методикой измеренные поля необходимо восстанавливать на различные расстояния в пределах ожидаемого диапазона дальностей, а реконструированная форма поверхности объекта получается в конечном счете путем пороговой обработки восстанавливаемых полей.

Для проверки метода обратного восстановления использовался тот же стальной шарик, что и в экспериментах по исследованию акустического эхо-импульсного метода. Проверка проводилась на аппаратуре одномерной обработки, в которой использовалась информация не о всей плоскости, а только вдоль линии сканирования. Одномерное преобразование Фурье, задаваемое выражением

$$G(u) = \int g(x; z) \exp(-j2\pi ux)\, dx, \quad (16.75)$$

приводит к одномерному эквиваленту разложения на плоские волны. Далее полученное выражение умножается на одномерную передаточную функцию распространения:

$$\exp\left(j2\pi\frac{z_1 - z_0}{\lambda}\sqrt{1-(\lambda u)^2}\right). \quad (16.76)$$

Обратное Фурье — преобразование полученного произведения определяет восстановленное поле. Полученное в результате описанных преобразований изображение соответствует практически идеальному восстановлению. Реконструированное по данному эксперименту изображение было получено пороговым отсечением по уровню половинной мощности.

В общем случае качество восстановленного по данному методу изображения зависит от размеров площади сканирования, используемой для учета информации о волновом поле. Лучше всего это можно пояснить на уже рассмотренном примере точечного объекта. Качество восстановления точечного объекта зависит от числа используемых периодов колебаний, размещаемых на измеряемой плоскости. (Кольцевая структура поля, изображенная на рис. 16.29, в оптике называется кольцами Френеля.) В идеальном случае для получения по методу обратного восстановления хорошо «сфокусированного» предмета надо иметь около 40 колец Френеля. На практике приемлемые результаты можно получить, даже если это условие не выполняется. Размеры изображения были эквивалентны размещению около 10 колец Френеля на линии сканирования (длина которой составляла порядка 25 см). Поскольку длина волны на частоте 50 кГц равна примерно 6 мм, то реконструированное изображение обладает близкой к максимально возможной на этой частоте разрешающей способностью.

16.6. Краткий библиографический обзор

В настоящей главе основное внимание было уделено методам измерения дальности. В ней однако не был затронут непосредственно связанный с этим важный вопрос автоматической интерпретации полученных данных. Под автоматической интерпретацией здесь понимается способность робота при обзоре сложной сцены на основе информации о дальностях и яркостях отдельных элементов автоматически распознавать их и определять позиционные взаимоотношения между ними. Хотя данный вопрос был оставлен без внимания прежде всего по причине ограниченного объема книги, но на это решение повлияла также не достаточная еще проработка темы в литературе. По этой теме читатель может найти более подробную информацию в работах [11, 27, 31 и 39].

Представленный в данной главе обзор алгоритмов отыскания соответствий при измерении дальностей стереоскопическими методами является, на наш взгляд, достаточно полным и отражающим все, что появилось в последнее время в литературе. По этим проблемам читатель может обратиться также к работам [8] и [2], авторы которых для нахождения соответствий использовали такие признаки, как границы, отрезки границ, а также их характеристики, например длину, значение контраста и т. п. Для этих же целей авторы работы [43] использовали некоторые инвариантные свойства многогранников.

Рассмотренные здесь разновидности первоначального варианта алгоритма Марра — Поджио — Гримсона и полученные на их основе результаты по определению дальностей были впервые представлены в работе [18]. Некоторые предварительные соображения относительно архитектуры вычислительных устройств, реализующих в реальном времени указанные алгоритмы, приведены в работе [38]. Вариант МПГ-алгоритма, рассмотренный в настоящей главе, основан на поэтапном переходе от грубых к точным измерениям. На первом этапе сопоставление образов стереопары производится с низкой разрешающей способностью, а на втором этапе происходит уточнение полученных соответствий. Такой поэтапный алгоритм был использован также авторами работ [28] и [10]. В данной главе были рассмотрены стереоскопические системы определения дальностей до различных элементов сцены, в которых использовалось только две точки наблюдения. Как уже упоминалось, точность определения расстояний в такой системе зависит от того, на сколько удалены друг от друга зрительные датчики. Однако повышение точности дальнометрии, достигаемое этим путем, сопровождается увеличением зон перекрытия для каждого из датчиков, в которых невозможно определить соответствия образов. Кроме того, увеличение базы стереосистемы приводит к увеличению получаемых значений смещений для одинаковых значений дальности, что ведет к расширению зоны поиска соответствий и, следовательно, к усложнению алгоритмов и увеличению времени поиска. Для того, чтобы избежать этих трудностей, предложено использовать более двух точек наблюдения (см. [28, 29, 46]). В алгоритме, изложенном в [28], учитываются только совместимые смещения, полученные от разных пар образов. В [29] множество образов используется для сужения окрестности поиска соответствий, а автор работы [46] предложил использовать корреляцию между всеми образами для повышения точности измерений.

В рассмотрении дальнометрии на базе лазерных датчиков мы ограничились только косвенными методами измерения временной задержки на основе амплитудной модуляции лазерного излучения. Однако сложности, возникающие из-за большого динамического диапазона интенсивностей, вызванного различием в свойствах диффузного отражения поверхностей, их разным наклоном, а также зависимостью мощности излучения от требуемого диапазона дальностей, присущи и всем методам непосредственного измерения [20]. Представляется несомненным, что методы непосредственной оценки дальностей обладают бо́льшим быстродействием, чем модуляционные. В работе [17] упомянута импульсная лазерная система непосредственного измерения временной задержки, которая способна измерять дальности с низким разрешением 64×64 элемента за 4 с.

В работах [44, 32, 33] показано, что местоположение и ориентацию плоских поверхностей объектов можно определить путем освещения сцены, состоящей из многогранников, прямоугольной сеткой линий и последующей двухмерной фильтрацией полученных данных. Полученный узор из пересекающихся светлых линий на плоских поверхностях состоит из сетки параллельных полос, ориентация которых зависит от наклона поверхности. Дальнейшее преобра-

зование Фурье светового узора позволяет разделить образ на фрагменты, соответствующие различным плоским поверхностям многогранников и характеризующиеся определенной ориентацией.

Библиографические обзоры разной степени подробности по составлению дальнометрических карт и интерпретации полученных дальномерных данных приведены в работах [7, 14, 17]. Автор считает необходимым также привлечь внимание читателя к фотометрическим стереометодам построения дальнометрических карт [47, 48]. В этих методах анализируемая сцена освещается несколькими соответствующим образом расположенными источниками света, а получениая информация о конфигурации теней т каждого источника в дальнейшем используется для составления дальнометрической карты. Если в задаче требуется определять только относительные расстояния, иногда [49, 50] используются оптические соотношения, получаемые при относительном перемещении камеры и сцены.

Благодарности. Мое обращение к исследованиям в области робототехники явилось следствием прежде всего моей приверженности всему, что связано с искусственным интеллектом. Многие студенты совместно со мной приняли тяжесть первых шагов приобретения опыта в данной области. Я особенно признателен тем слушателям моего курса по компьютерной стереодальнометрии, которые согласились участвовать в исследованиях метода Марра — Поджио. Все они отлаживали свои программы обработки на собственных стереофотографиях реальных сцен. Некоторые результаты по определению дальности стереоскопическими методами, полученные ими, приведены в настоящей главе.

Мой интерес к стереоскопической дальнометрии возник во время участия в семинаре, проводимом Э. Гримсоном в университете Пэрдью. Я весьма признателен ему за обсуждения, которые явились толчком для исследований в данном направлении.

Увлечение ультразвуковой дальнометрией явилось следствием моих многолетних теоретических изысканий и экспериментальных работ по обработке изображений, полученных в рентгеновском, ультразвуковом и микроволновом диапазонах волн.

Р. Сафранек, работающий в настоящее время под моим руководством над докторской диссертацией по стереосистемам технического зрения, предоставил результаты своих исследований, составившие бо́льшую часть материала по этой тематике. Я весьма ему благодарен. Выражаю признательность аспиранту-заочнику университета Пэрдью С. Пэну, а также М. Слэни, Х. Ягу, М. О'Бойлу и М. Андерсону, работающим под моим руководством над докторскими диссертациями, за множество плодотворных дискуссий. Все они представили результаты своих работ, которые приведены в настоящей главе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Agin, G. J. and Binford, T. O., Computer description of curved objects, *Proceedings of Third International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1973, pp. 629—640.
2. Arnold, R. D., Local context in matching edges for stereo vision, *Proceedings of Image Understanding Workshop*, 1978, pp. 65—72.
3. Baker, H. H. and Binford, T. O., Depth from edge and intensity based stereo, *International 1981 Joint Conference on Artificial Intelligence*, Vol. 6, pp. 631—636.
4. Binford, T. O., Inferring surfaces from images, *Artificial Intelligence*, Vol. 17, 1981, pp. 205—245.
5. Barnard, S. T. and Thompson, W. B., Disparity analysis of images, *IEEE Transactions PAMI*, PAMI-2, 1981, pp. 333—340.
6. Bajcsy, R. and Lieberman, L., Texture gradient as a depth cue, *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 5, 1976, pp. 52—76.
7. Brady, M., Computational Approaches to Image Understanding, *Computing Surveys*, Vol. 14, 1982, pp. 3—71.
8. Burr, D. J. and Chien, R. T., A system for stereo computer vision with geometric models, *Proceedings of Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1977, p. 583.
9. Caulfield, H. J., Hirschfeld, T., Weinberg, J. M., and Herron, R. E., Laser Stereometry, *Proceedings of IEEE*, Vol. 65, 1977, pp. 84—88.
10. Dev, P., Perception of depth surfaces in random-dot stereograms: A neural model, *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 7, 1975, pp. 511—528.
11. Duda, R. O., Nitzan, D., and Barrett, P., Use of range and reflectance data to find planar surface regions, *IEEE Transactions PAMI*, PAMI-1, 1979, pp. 259—271.

12. Grimson, W. E. L., A computer implementation of a theory of human stereo vision, *Philosophical Transactions Royal Society London*, B. 292, 1981, pp. 217—253.
13. Grimson, W. E. L., *From images to surfaces: A computational study of the human early visual system*, M. I. T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1981.
14. Hall, E. L., Tio, J. B. K., McPherson, C. A., Sadajadi, F. A., Measuring curved surfaces for robot vision, *Computer*, Vol. 15, December 1982, pp. 42—54.
15. Helava, U. V., Digital Correlation in Photogrammetry Instruments, *Photogrammetria*, Vol. 34, 1978, pp. 19—41.
16. Henderson, R. L., Miller, W. J., and Grosch, C. B., A flexible approach to digital stereo mapping, *Photogrammetry Engineering of Remote Sensing*, Vol. 44, 1978, pp. 1499—1512.
17. Jarvis, R. A., A perspective on range finding techniques for computer vision, *IEEE Transactions PAMI*, Vol. PAMI-5, 1983, pp. 122—139.
18. Kak, A. C., Implementation of the Marr-Poggio paradigm for stereo vision: A perspective for engineering applications, presented at the Workshop on Sensors and Algorithms for 3-D Vision (held in conjunction with the *Conference of the American Association of Artificial Intelligence*), Washington, D. C., 1983. (Being prepared for publication; request copies from the author.)
19. Levine, M. D., O'Handley, D. A., and Yagi, G. M., Computer determination of depth maps, *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 2, 1973, pp. 131—150.
20. Lewis, R. A. and Johnston, A. R., A scanning laser rangefinder for a robotic vehicle, *Proceedings of the Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1977, pp. 762—768.
21. Loughlin, C., Eye-in-hand robot vision scores over fixed camera, *Sensor Review*, Vol. 3, 1983, pp. 23—26.
22. Lucas, B. D. and Kanade, T., An iterative image registration technique with an application to stereo vision, *Proceedings of the Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*, August 1981, pp. 674—679.
23. Marr, D. and Poggio, T., A theory of human stereo vision, *Proceedings of the Royal Society London*, B., Vol. 204, 1979, pp. 301—328.
24. Marr, D., *VISION: A Computational Investigation in the Human Representation and Processing of Visual Information*, W. H. Freeman, San Francisco, 1981.
25. Maxwell, D. E., A 5 to 50 MHz direct reading phase meter with hundredth-degree precision, *IEEE Transactions on Instrument Measures*, Vol. IM-15, 1966, pp. 304—310.
26. McVey, E. S. and Lee, J. W., Some accuracy and resolution aspects of computer vision distance measurements, *IEEE Transactions PAMI*, Vol. PAMI-4, 1982, pp. 646—649.
27. Mitiche, A. and Aggarwal, J. K., Detection of edges using range information, *IEEE Transactions PAMI*, Vol. PAMI-5, 1983, pp. 174—178.
28. Moravec, H. P., Rover visual obstacle avoidance, *Proceedings of the Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1981.
29. Nevatia, R., Depth measurement by motion stereo, *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 5, 1976, pp. 203—214.
30. Nitzan, D., Brain, A. E., and Duda, R. O., The measurement and use of registered reflectance and range data in scene analysis, *Proceedings of IEEE*, Vol. 65, 1977, pp. 206—220.
31. Oshima, M. and Shirai, Y., Object recognition using three-dimensional information, *IEEE Transactions PAMI*, Vol. PAMI-5, 1983, pp. 353—361.
32. Pennington, K. S., Will, P. M., Shelton, G. L., Grid coding: A technique for extraction of differences from scenes, *Optics Communications*, Vol. 2, 1970, pp. 113—119.
33. Pennington, K. S., and Will, P. M., A grid-coded technique for recording 3-dimensional scenes illuminated with ambient light, *Optics Communications*, Vol. 2, 1970, pp. 167—169.
34. Posdamer, J. L. and Altschuler, M. D., Surface measurement by space-encoded projected beam systems, *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 18, 1982, pp. 1—17.
35. Rice, S. O., Mathematical analysis of random noise, *Bell. System Technical Journal*, Vol. 24, 1945, pp. 46—156.

36. Rosenfeld, A. and Kak, A. C., *Digital Picture Processing*, Vols. 1 and 2, 2nd ed., Academic Press, 1982.
37. Ryan, T. W., Gray, R. T., and Hunt, B. R., Prediction of correlation errors in stereo-pair images, *Optical Engineering*, Vol. 19, 1980, pp. 312—322.
38. Safranek, R. J. and Kak, A. C., Stereoscopic depth perception for robot vision: Algorithms and Architectures, *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers*, 1983, pp. 76—79.
39. Shirai, Y., Recognition of polyhedra with a range finder, *Pattern Recognition*, Vol. 4, 1972, pp. 243—250.
40. Stoer, J. and Bulirsch, R. *Introduction to Numerical Analysis*, Springer-Verlag, 1980, pp. 198—208.
41. Sweeney, D. W. and Hudelson, G. D., Optical tracking with Fresnel zone plate coded aperture imaging, unpublished.
42. Thompson, A. M., Camera geometry for robot vision, *Robotics Age*, March/April 1981, pp. 20—27.
43. Underwood, S. A. and Coates, C. L., Visual learning from multiple views, *IEEE Transaction on Computers*, Vol. C-24, 1975, pp. 651—661.
44. Will, P. M. and Pennington, K. S., Grid coding: A preprocessing technique for robot and machine vision, *Artificial Intelligence*, Vol. 2, 1971, pp. 319—329.
45. Yakimovsky, Y. and Cunningham, R., A system for extracting three-dimensional measurements from a stereo pair of TV cameras, *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 7, 1978, pp. 195—210.
46. Tsai, R. Y., Multiframe image point matching and 3-D surface reconstruction, *IEEE Transaction Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-5, March 1983, pp. 159—174.
47. Ikeuchi, K. and Horn, B. K. P., Numerical shape from shading and occluding boundaries, *Artificial Intelligence*, Vol. 17, 1981, pp. 141—185.
48. Ikeuchi, K., Determination of surface orientations of specular surfaces by using the photometric stereo, *Proceedings of the IEEE*, 1981.
49. Horn, B. K. P. and Schunck, B. G., Determining optical flow, *Artificial Intelligence*, Vol. 17, 1981, pp. 185—204.
50. Lawton, D. T., Processing translational motion sequences, *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, Vol. 22, 1983, pp.116—144.

Глава 17

ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЕ МАНИПУЛЯТОРАМИ

А. К. Бейчи, лаборатория исследования реактивного движения, Калифорнийский технологический институт, г. Пасадена, шт. Калифорния

17.1. Телеуправление манипулятором

Термин «телеуправление манипулятором» относится к области телемеханики и означает использование дистанциоино управляемых оператором подвижных робототехнических устройств, способных манипулировать различными объектами и воспринимать параметры окружающей среды. Дистанционное управление может быть ручным, автоматическим или гибридным. Сегодня самый многочисленный класс телеуправляемых устройств составляют манипуляторы и рабочие органы роботов.

Как правило, промышленные роботы предназначены для замены рабочих, выполняющих четко определенные, монотонные (а часто утомительные) операции. Телеуправляемые устройства и роботы усиливают возможности человеческих мускулатуры и органов чувств, и предназначены для работы в отдаленных, труднодоступных и опасных для человека местах. Как правило, телеуправляемые устройства выполняют неповторяющиеся и не всегда точно определенные операции. Промышленные роботы представляют собой автоматические системы, телеуправляемые устройства всегда требуют активных действий оператора. Телеуправляемые устройства и роботы давно применяются в ядерной энергетике для работы с радиоактивными веществами. В последнее время телеуправляемые устройства стали применяться в космосе, исследованиях Арктики, при проведении глубоководных и горных работ. Одним из представителей телеуправляемых устройств нового поколения является шестнадцатиметровый манипулятор, установленный на борту космического корабля типа «Шаттл». Он управляется астронавтом, находящимся в кабине. Некоторые из последних работ по телеуправлению манипуляторами перечислены в библиографии, приведенной в конце настоящей главы.

Разработка телеуправляемых роботов связана с решением различных задач. Эти задачи можно разделить на два класса: 1) разработка собственно робота-манипулятора или подвижного устройства, способного выполнять определенные задания в тех или иных условиях; 2) разработка систем телеуправления и телеметрии, методов и средств, предназначенных для организации взаимодействия человека с машиной, обеспечивающего эффективную и безопасную работу устройства. Задачи, относящиеся к первому классу, рассматриваются в гл. 9 настоящего справочника.

В этой главе рассматриваются задачи второго класса, касающиеся систем управления, телеметрии, взаимодействия человека с машиной (применительно к дистанционному управлению роботами). Главным образом, представлены устройства и методы: 1) формирующие или дополняющие зрительную информацию, передаваемую оператору, управляющему роботом; 2) упрощающие взаимодействие оператора с системой телеуправления; 3) способствующие внедрению программно управляемых средств автоматизации телеуправления. В разд. 17.2 рассматриваются общие положения и роль человеческого фактора. В разд. 17.3 описаны различные датчики. Разд. 17.4 посвящен различным аспектам организации управления (приводится несколько примеров организации интерфейса человек — машина). В разд. 17.5 рассмотрены способы отображения телеметрической информации.

17.2. Общие требования к телеуправлению

К методу телеуправления роботом предъявляются достаточно жесткие требования. Как правило, требуется координированное управление несколькими (обычно шестью) звеньями манипулятора с учетом кинематических и динамических ограничений, а также состояния окружающей среды. Кроме того, для успешного выполнения задания сигналы, поступившие от различныэ датчиков в устройство управления, должны обрабатываться в реальном масштабе времени. В дополнение ко всему многие манипуляции могут выполняться несколькими различными способами. Следовательно, телеуправление роботом, выполняющим задание, связанное с манипулированием различными объектами, подразумевает слежение за состоянием управляемого робота и принятие в цикле управления решений различного уровня.

Важнейшее звено телеуправляемой системы — человек, оператор. Как в ручном, так и в автоматическом режиме управления главная роль принадлежит ему. Участие человека в процессе управления обеспечивает адекватность реагирования телеуправляемого робота в постоянно меняющейся непредсказуемым образом внешней среде. В системе телеуправления оператор выступает в качестве блока со входом и выходом (рис. 17.1): он получает от телеуправляемой системы телеметрическую информацию и посылает ей команды управления. Опыт оператора, его способность

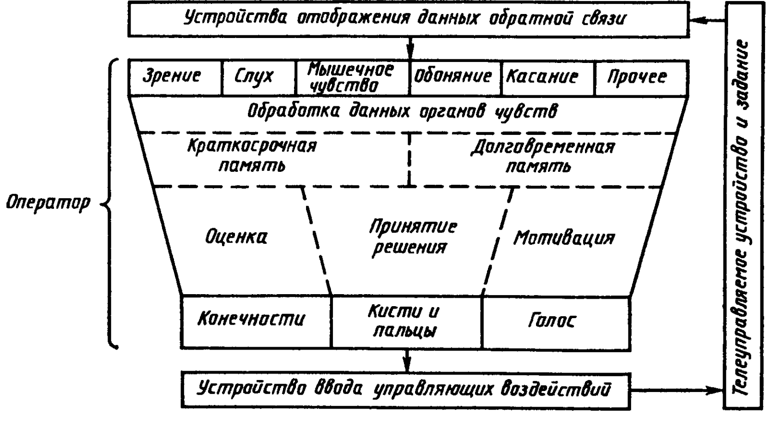


Рис. 17.1. Человек как устройство управления

оценивать ситуацию и принимать решения во многом определяют эффективность выполнения задания.

Известно, что скорости, с которыми человек может воспринимать и передавать информацию, ограничены. В этом смысле оператор выступает в роли «узкого места» информационного и командного потоков. Возможности человека как устройства обработки информации сравнительно невелики. Кроме того, его коммуникативные способности асимметричны — каналов получения информации (ввода) гораздо больше, чем передачи (вывода команд).

Для повышения эффективности работы оператора развитие подсистем управления, отображения информации и взаимодействия современных телеуправляемых устройств должно идти по двум направлениям: 1) совершенствования устройств и методов, позволяющих оператору телеуправляемого устройства подавать команды в терминах, описывающих задание, и 2) совершенствования устройств и методов представления телеметрической информации в форме, наиболее удобной для восприятия оператором, и соответствующей имеющимся органам управления, а также их расположению на рабочем месте оператора.

Процесс выполнения задания начинается с его описания. В процессе преобразования описания в действия устройства, выполняющего описанное задание, информационный и командный потоки проходят через несколько функциональных блоков. На рис. 17.2 представлены основные компоненты многоуровневой системы телеуправления (телеметрии). Первый (нижний) уровень управления обозначен буквой D. На этом уровне управление осуществляется в реальном масштабе времени. На этом уровне генерируются команды на перемещение манипулятора, происходят взаимодействие рабочего органа с внешней средой и формирование сигналов датчиков. Объем данных, формируемых на этом уровне, огромен, а информационные и командные потоки представлены в основном аналоговыми сигналами. Второй уровень управления (на рис. 17.2 — блоки B и C) называется алгоритмическим. На этом уровне командные и информационные потоки обрабатываются конечным числом алгоритмов, а информационный обмен с верхним и нижним уровнями осуществляется не постоянно, а сеансами определенной продолжительности. На этом уровне происходит преобразование описания задания на уровень команд привода и взаимодействия с подсистемами очувствления и датчиками. Третий (высший) уровень управления (на рис. 17.2 — A) соответствует оператору. Из рисунка видно, что его основная функ-

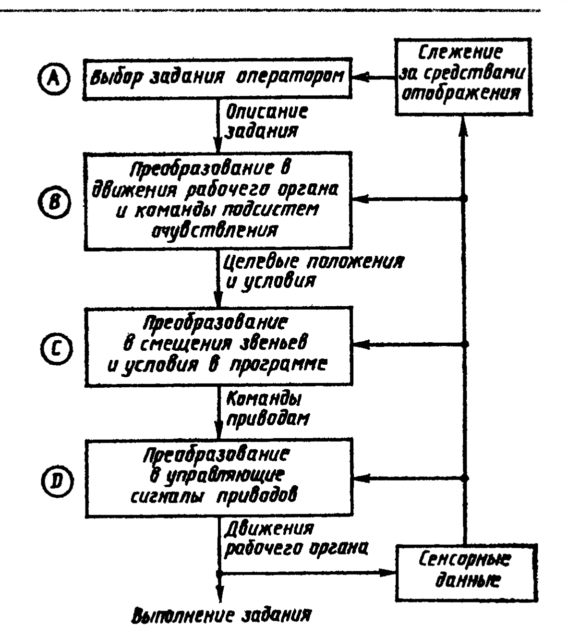


Рис. 17.2. Уровни управления в системе телеуправления (телеметрии)

ция — описание задания и слежение за его выполнением. Оператор выбирает, параметризует или корректирует алгоритмы управления нижних уровней. Высший уровень управления опирается на способность оператора думать, накапливать опыт, рассуждать и разбивать задание на операции, каждую из которых может выполнить телеуправляемое устройство с ограниченными возможностями.

Наиболее совершенные средства автоматизации оснащены системами программного управления. Возможность задания программы делает такие устройства технологически гибкими, что выгодно отличает их от специальных устройств «жесткой» автоматизации. Управляющие работой таких устройств данные могут порождаться источниками двух типов: системами моделирования и системами очувствления. Данные, порождаемые системами моделирования, строятся на базе априорной информации о роботе и выполняемом им задании. Подсистемы очувствления в реальном масштабе времени порождают данные о ходе выполнения задания роботом. Как правило, для использования обоих типов источников данных необходима ЭВМ.

Телеуправляемые роботы должны иметь гибкие устройства управления и обработки данных, способные обеспечить выполнение задания в условиях непрерывного и не-

предсказуемого изменения условий. Использование средств автоматизации с программным управлением позволяет улучшить рабочие характеристики телеуправляемых устройств за счет повышения уровня описания задания и отображения телеметрической информации.

17.3. Подсистемы очувствления

Важнейшую роль в телеуправлении роботами играют подсистемы очувствления (зрительные и другие). Зрительное очувствление осуществляется либо непосредственным наблюдением оператора за рабочей зоной, либо с помощью телевизионных систем (возможно, стереоскопических или дальномерных). Зрительная информация, используемая для управления манипулятором, имеет геометрический характер. По ней определяются координаты манипулятора после выполнения больших перемещений. Система координат может связываться как с манипулятором, так и с объектами.

Информация от незрительных подсистем очувствления дополняет визуальную информацию и необходима для повышения точности управления манипулятором и рабочим органом в непосредственной близости от различных объектов. К таким подсистемам очувствления относят дальномерные, силомоментные и тактильные. Датчики этих подсистем очувствления обычно размещаются на манипуляторе и рабочем органе [3]. С помощью этих датчиков получаются данные, необходимые для управления точными движениями манипулятора (например, при совмещении рабочего органа с объектом). Такие данные выражаются в системе координат, связанной с манипулятором. В настоящее время использование незрительных подсистем очувствления постоянно растет.

17.3.1. Дальномерные подсистемы

Датчики этих систем измеряют направление до ближайшего препятствия в заданном направлении (как правило, расстояние от рабочего органа до объекта). Наиболее распространены оптоэлектронные, электрические и акустические дальномерные датчики. В состав оптоэлектронных дальномерных датчиков входят источник света (как правило, используется светоизлучающий диод или маломощный лазер) и фотодетектор. В электрических дальномерных датчиках используются детекторы токов Фуко, измерители емкости и приборы на основе эффекта Холла [3]. Акустические датчики действуют по принципу ультразвуковой локации. В работах [2, 3] приведен достаточно полный обзор принципов построения дальномерных датчиков и перечислены их недостатки и преимущества.

В лаборатории исследования реактивного движения были разработаны оптоэлектронные датчики для различных типов манипуляторов. В последних разработках [2] источник света и фотодетектор располагаются не на рабочем органе, а в устройстве управления манипулятором. На рабочем органе установлена небольшая оптическая головка, соединенная с устройством управления волоконными световодами. Применение волоконной оптики повышает надежность датчика и упрощает его установку на рабочем органе.

В частности, в лаборатории исследования реактивного движения был разработан датчик для установки на шестнадцатиметровом манипуляторе космического корабля многоразового использования «Спейс Шаттл». Его предполагается использовать при переноске объектов и обслуживании спутников на орбите. Этот датчик позволяет одновременно измерять расстояние до объекта, тангаж, крен и рысканье рабочего органа относительно нормали к поверхности объекта. Эти данные существенно упрощают управление рабочим органом в непосредственной близости от объекта, когда точность визуальной оценки угловых погрешностей резко падает. Данные о величинах угловых погрешностей наглядно отображаются на экране видеотерминала. При отображении используются цвет и звуковая индикация событий [4].

17.3.2. Силомоментные подсистемы

Силомоментные датчики измеряют усилия и крутящие моменты, приложенные к манипулятору. Все величины измеряются в системе координат, связанной с манипулятором. Предполагается, что силы и моменты приложены к точке, не совпадающей с центром силомоментного датчика (который обычно устанавливается в месте присоединения рабочего органа к манипулятору).

В силомоментных датчиках используются механические суммирующие элементы, преобразующие приложенные к ним усилия в малые перемещения. Эти элементы связаны с электронными преобразователями. Возможны различные пары элемент — преобразователь. В силомоментных датчиках, определяющих усилия и моменты, приложенные к рабочему органу по шести степеням подвижности, чаще всего в качестве преобразователей используются тензометры (как правило, полупроводниковые).

Для телеуправляемых роботов в лаборатории исследования реактивного движения,

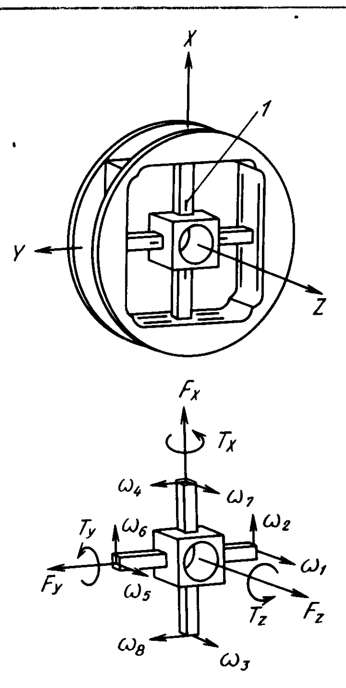


Рис. 17.3. Силомоментный датчик, измеряющий шесть сил и моментов — система координат:
1 — тензометр

было разработано несколько типов силомоментных датчиков (в том числе датчик для манипулятора космического корабля многоразового использования [5]). Существуют подсистемы очувствления, укомплектованные этими датчиками. Механически датчик представляет собой мальтийский крест. Для исключения явления механического гистерезиса он изготовлен из монолитной алюминиевой заготовки (рис. 17.3). На четырех брусках креста установлены кремниевые полупроводниковые тензометры (ближе к центральному отверстию). На каждой из четырех сторон каждого из брусков установлено по два тензометра, всего 32 штуки. Пары тензометров на противоположных сторонах брусков соединены по мостовой схеме. Сигнал, снимаемый с диагонали такого моста, пропорционален разности механических напряжений на противоположных сторонах бруска. Датчик в целом формирует восемь сигналов, по которым можно определить величину трех ортогонально приложенных сил и трех моментов вращения в системе координат датчика. Матрица преобразования отсчетов датчика имеет размерность 6×8, причем при отсутствии погрешностей только 16 элементов этой матрицы независимы.

Для проведения экспериментов в космическом центре Джонсона датчик был установлен на манипулятор, оснащенный специальным захватом и системой отображения телеметрической информации. Данные, формируемые силомоментным датчиком, отображаются на экране видеотерминала в графическом виде. Оператор обрабатывает эту информацию и вводит команды с помощью системы пропорционального управления космическим манипулятором. Проведенные эксперименты показали, что датчик можно использовать при выполнении заданий в условиях динамически меняющихся ограничений геометрического характера. В частности, оказалось, что все без исключения операторы смогли выполнять операцию захватывания объекта при отключенной подсистеме зрительного очувствления лишь по показаниям силомоментного датчика. Более подробно проведенные эксперименты описаны в работе [6].

17.3.3. Тактильные подсистемы

Тактильные подсистемы определяют величину и распределение давления на рабочий орган в зоне его контакта с объектом. Величины давления измеряются по двум составляющим: нормальной и касательной к плоскости рабочего органа. Тактильные датчики могут быть одно- и многоточечными, двоичными (вырабатывающими значения «Да» и «Нет») и аналоговыми. В качестве чувствительных элементов тактильных датчиков используются тензометры, тензочувствительные эластомеры, емкостные и пьезоэлектрические преобразователи. Более подробно принципы построения тактильных датчиков рассмотрены в работе [7]. К последним достижениям в этой области относятся датчики на основе полимерных материалов [8] и волоконной оптики в сочетании с осветителями инфракрасного диапазона излучения [9]. В качестве простейшего тактильного датчика может служить микропереключатель.

В лаборатории исследования реактивного движения был разработан тактильный датчик слоистой структуры [10]. Его устройство показано на рис. 17.4. Отличительная черта этого датчика состоит в том, что он представляет собой конструктивно завершенный элемент, который может использоваться, например, в качестве части пальца захвата. Датчик может использоваться в двух режимах: 1) индикации давления (двоичный выходной сигнал) и 2) измерения величины приложенного давления (применение тензочувствительного пластика, сопротивление которого пропорционально степени сжатия, позволяет формировать ана-

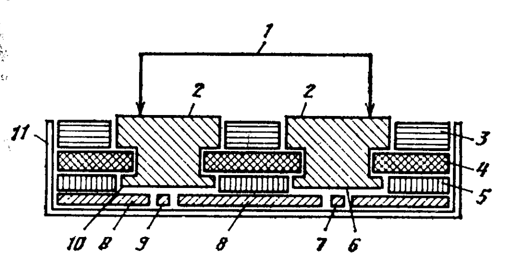


Рис. 17.4. Тактильный датчик слоистой структуры:
1 — давление; *2* — контактные площадки; *3* — покрытие; *4* — резиновая прокладка; *5* — изолирующая шайба; *6* — зазор, исчезающий при наличии давления; *7* — электрод; *8* — общий провод; *9* — электрод; *10* — слой пьезочувствительного проводящего материала в зазоре; *11* — корпус датчика

логовый сигнал). Следует отметить еще две особенности этого датчика: 1) чувствительные элементы механически и электрически независимы друг от друга, и 2) чувствительные элементы хорошо защищены от повреждения, так как находятся в нижнем слое и не контактируют с окружающей средой.

17.4. Устройства управления

В системах с телеуправляемыми средствами автоматизации чаще всего используются два режима управления: копирующее управление с силовым загружением задающего органа и гибридное управление с использованием ЭВМ и подсистем очувствления.

17.4.1. Копирующее управление с силовым загружением

Режим копирующего управления с силовым загружением позволяет оператору оценивать силы и моменты, действующие на рабочий орган манипулятора, по величине сопротивления задающего органа. Оператор кинематически и динамически связан с управляемым им манипулятором и активно использует мышечное чувство. Этот режим управления характеризуется тем, что оператор задает управляющие воздействия движениями собственного тела и воспринимает данные обратной связи на чувственном уровне. При этом, как правило, оператор может управлять линейным перемещением рабочего органа по трем направлениям, а также его вращением относительно трех ортогональных осей. Такая схема организации взаимодействия человека с механическим устройством играет важную роль в телеуправлении (рис. 17.5).

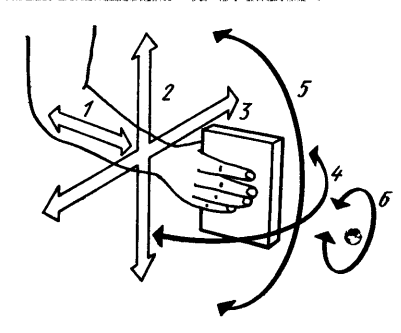


Рис. 17.5. Использование задающего органа в системе копирующего управления с силовым загружением:
1 — перемещения вперед-назад: *2* — перемещения вверх-вниз; *3* — перемещения влево-вправо; *4* — рысканье; *5* — тангаж; *6* — крен

Копирующее управление с силовым загружением активно используется (например, только в отраслях атомной энергетики используются тысячи манипуляторов с таким управлением). В таком режиме управления задающее устройство жестко связано с исполнительным, чаще всего такая связь достигается с помощью механических устройств, но в случаях, когда расстояние между задающим и исполнительным органом слишком велико, применяются системы сервоуправления.

Широкое распространение устройств с копирующим управлением сдерживается несовершенством задающих устройств. В большинстве современных установок задающее устройство представляет собой точную копию исполнительного, причем для управления каждым манипулятором необходимо свое задающее устройство.

В лаборатории исследования реактивного движения было разработано новое устройство копирующего управления с силомоментным загружением и универсальным задающим органом [11]. Задающий орган имеет шесть степеней подвижности при силомоментном загружении по данным подсистемы очувствления, измеряющей силы и моменты, приложенные к присоединительному фланцу телеуправляемого манипулятора. Универсальность задающего органа следует понимать в том смысле, что он не копирует геометрическую или кинематическую структуру какого-либо конкретного манипулятора, но может использоваться для управления любым из них.

Соответствие между положением универсального задающего устройства и манипулятора устанавливается с помощью математических преобразований управляющих переменных звеньев. Аналогично силы и моменты, измеренные датчиком подсистемы

силомоментного очувствления на запястье манипулятора, преобразуются в команды системы сервоприводов задающего устройства, что позволяет оператору воспринимать их на чувственном уровне [12]. Преобразования управляющих переменных и отсчетов датчика выполняются в реальном масштабе времени специализированной микроЭВМ. Такая реализация преобразований позволяет синхронизировать перемещения задающего устройства и управляемого манипулятора (воспроизводя задержки и переходные процессы на задающем устройстве). Разработка и анализ системы управления описаны в работе [13], некоторые экспериментальные результаты — в работе [14].

Описанная обобщенная методика копирующего управления с силовым загружением позволяет избавиться от неудобств, связанных с использованием современных задающих устройств.

17.4.2. Интерактивное гибридное управление с использованием подсистем очувствления

В этом режиме управления сигналы от датчиков, установленных на телеуправляемом манипуляторе, поступают в управляющую ЭВМ и используются для согласования команд, подаваемых оператором, с изменяющимися условиями выполнения задания. Согласование выполняется в реальном масштабе времени специальными управляющими алгоритмами. Оператор имеет возможность выбирать используемый алгоритм с помощью программного меню.

В лаборатории исследования реактивного движения была разработана экспериментальная система управления роботом с шестью степенями подвижности и подсистемами дальномерного и силомоментного очувствления. Разработка выполнялась в рамках программы исследования взаимодействия человека и машины в процессе телеуправления. Интерактивность управления следует понимать в том смысле, что некоторые движения манипулятора в рабочем пространстве выполняются по командам оператора. Однако некоторая часть движений задается управляющей ЭВМ, обрабатывающей телеметрические данные, поступающие от подсистем очувствления. В распоряжение оператора предоставлено несколько программ. В процессе выполнения задания оператор решает, какие автоматические функции должны быть выполнены, и с помощью программного меню запускает или прерывает выполнение тех или иных программ. Выбор автоматических функций может выполняться также с помощью переключателей, соединенных с управляющей ЭВМ. Программное меню может меняться по ходу выполнения задачи. Отметим, что в подобной гибридной системе управления оператор взаимодействует с управляющей ЭВМ как по аналоговым, так и по цифровым каналам передачи информации. Также отметим, что предельными вариантами такого режима являются полностью копирующее и полностью автоматическое управление.

Система программного обеспечения системы гибридного управления проектировалась в предположении, что любое конкретное задание можно рассматривать как совокупность взаимосвязанных действий, вызванных либо воздействиями оператора на задающее устройство, либо командами, сгенерированными управляющими алгоритмами. Для упрощения синтеза этой совокупности выделяются три типа действий: базовые, составные и сложные. К базовым действиям относятся элементарные перемещения (например, соответствующие единичному изменению значения управляющей переменной звена), привязанные к системе координат задания. Составные действия представляют собой совокупность нескольких базовых, выполняемых последовательно или одновременно (например, сопровождение движущегося объекта). Выполнение сложных действий определяется правилами следования, задающими порядок выполнения входящих в них составных действий. Правила следования определяют также условия, необходимые для начала или завершения тех или иных действий. Правила следования могут представляться в графической форме (в виде графов).

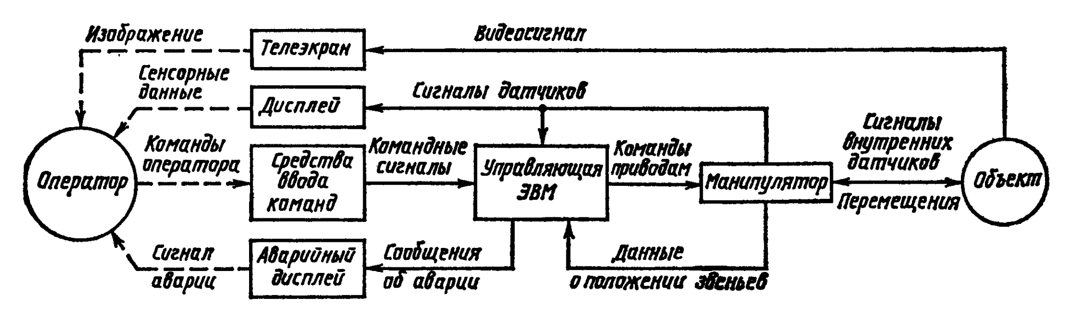


Рис. 17.6. Гибридная аналого-цифровая система управления, использующая средства очувствления

Реализация экспериментальной системы управления описана в работе [15]. Структурная схема этой экспериментальной системы представлена на рис. 17.6. Ручное управление осуществляется по параметрам скорости или положения, с помощью соответствующих управляющих программ. Возможность сочетать ручное и автоматическое управление в процессе выполнения одного задания, функции, действия позволяет пользоваться преимуществами обоих режимов.

17.4.3. Речевое управление

При телеуправлении информационный обмен человека и управляемого устройства носит опосредованный характер. Как правило, для ввода любой команды (даже команды ЭВМ) оператор должен руками выполнять какие-либо действия. Передача информации человеку требует подключения его органов зрения. Это ограничивает гибкость и эффективность телеуправления. Использование большую часть времени свободного речевого канала позволяет не пользоваться вводом команд вручную и не отвлекаться на чтение сообщений.

Системы речевого вывода и распознавания речевых команд постоянно совершенствуются, что позволяет использовать их в системах телеуправления. В лаборатории исследования реактивного движения разработано несколько таких систем [16]. Примером такой системы может служить система телеуправления бортовыми телевизионными камерами и мониторами космического корабля типа «Спейс Шаттл». При работе с ней оператор одновременно управляет космическим манипулятором, поэтому его руки и зрение постоянно заняты. Некоторые задания, выполняющиеся с помощью космического манипулятора, могут потребовать подачи примерно 50—70 команд управления четырьмя телекамерами и двумя мониторами в течение 15—20 мин. Наземные испытания системы [17] показали, что речевые команды распознаются в 96—100 % случаев, и позволили сделать следующие выводы: 1) практическое использование речевого ввода команд вполне возможно; 2) использование речевого ввода упрощает организацию взаимодействия человека с управляемым устройством; 3) рабочие характеристики системы с речевым вводом команд сильно зависят от индивидуальных особенностей оператора и степени его тренированности.

17.5. Отображение телеметрической информации

Современные подсистемы очувствления (дальномерного, тактильного и силомоментного) генерируют достаточно большой объем данных. Все эти данные должны быть восприняты и обработаны оператором, иногда — за доли секунды. В общем случае обработка таких данных достаточно сложна и неоднозначна, что приводит к резкому возрастанию нагрузки на оператора. Кроме того, при обработке данных часто требуется визуально оценивать их соотношения (рис. 17.7).

17.5.1. Устройства отображения с индикацией события

По определению устройства отображения с индикацией события отображают многомерное пространство параметров и сочетания значений параметров, соответствующие цели выполняемой операции. Предполагается, что цель выполнения любой телеуправляемой операции может быть представлена некоторым сочетанием (сочетаниями) значений параметров, измеряемых подсистемами очувствления. Такие устройства отображения реализуются на базе графических видеотерминалов с помощью программ реального времени, которые: 1) представляют телеметрическую информацию в требуемом виде и 2) управляют работой видеотерминала. Эти программы позволяют задавать различные сочетания параметров, соответствующих цели, и могут использоваться при выполнении различных заданий.

В лаборатории исследования реактивного движения было разработано несколько устройств отображения дальномерной, тактильной и силомоментной телеметрической информации [18]. В некоторых устройствах используются черно-белые видеотерминалы, а достижение цели индицируется с помощью мерцания изображения. В устройствах, укомплектованных цветными видеотерминалами, достижение цели индицируется изменением цвета.

Устройства отображения с индикацией события позволяют повысить компактность представления телеметрической информации, упрощая ее восприятие оператором.

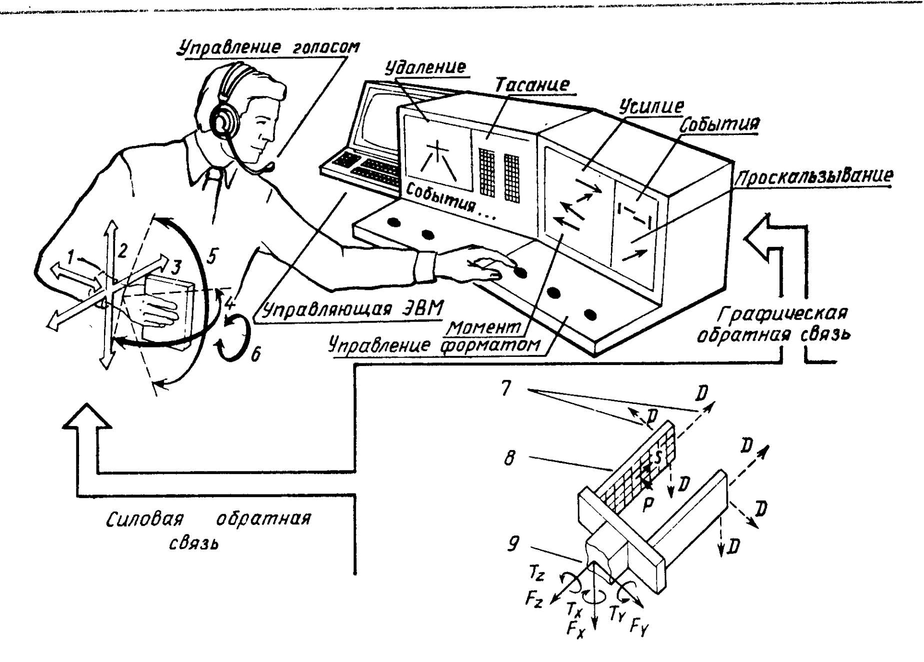


Рис. 17.7. Совместное использование графического, силового, командного и голосового интерфейса оператора с системой управления (вместо „Тасание" следует читать „Касание"):
1—6 — управление положением рабочего органа; *7* — дальномерные датчики; *8* — датчики касания и проскальзывания; *9* — силомоментные датчики

17.5.2. Устройства отображения с переключением формата

Как правило, в ходе выполнения задания оператор последовательно работает с различными устройствами отображения. Например, когда активно используется подсистема дальномерного очувствления, не используется силомоментный датчик, и наоборот. Это позволяет совместить все устройства отображения, в котором содержание и формат отображаемой телеметрической информации определяются в зависимости от выполняемого шага задания. В лаборатории исследования реактивного движения было разработано несколько таких устройств [19]. В них переключение формата выполняется автоматически, в моменты достижения цели того или иного шага задания. Момент достижения цели фиксируется по сочетанию параметров, измеряемых подсистемами очувствления. Форматы, соответствующие шагам задания, выбраны так, чтобы максимально упростить работу оператора в специфических условиях выполнения каждого шага. В вычислительной машине переключение форматов осуществляется программами реального времени, использующими сетевое представление состояний системы.

17.6. Заключение

Использование телеуправляемых устройств требует гибких систем управления и отображения телеметрической информации. Использование подсистем очувствления и управляющих ЭВМ позволяет существенно повысить гибкость телеуправляемых устройств за счет повышения уровня «интеллектуальности» взаимодействия человека и машины. Совершенствование устройств автоматизации с программным управлением и методов управления работой роботов на уровне заданий возможно только в результате объединения усилий специалистов в различных областях. При проектировании современных телеуправляемых устройств следует учитывать человеческий фактор.

Глава написана в лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института для НАСА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sheridan, T. B. and Ferrell, W. R., *Man-Machine Systems*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1974.

2. Bejczy, A. K., Smart Sensors for Smart Hands, in *Progresses in Astronautics and Aeronautics*, Vol. 67, Publ. AIAA, New York, 1979.
3. McDermott, J., Sensors and Transducers, A Special Report, *Electronic Data News*, March 20, 1980.
4. Bejczy, A. K., Brown, J. W., and Lewis, J. L., Evaluation of Smart Sensor Displays for Multidimensional Precision Control of Space Shuttle Remote Manipulator, *Proceedings of the 16th Annual Conference on Manual Control*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, May 5—7, 1980.
5. Bejczy, A. K., and Dotson, R. S., A Force-Torque Sensing and Display System for Large Robot Arms, *Proceedings of the IEEE Southeastcon'82*, Destin, Florida, April 4—7, 1982.
6. Bejczy, A. K., Dotson, R. S., Brown, J. W., and Lewis, J. L., Manual Control of Manipulator Forces and Torques using Graphic Display, *Proceedings of the IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics*, Seattle, Washington, October 28—30, 1982.
7. Harmon, L. D., Automated Tactile Sensing, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 1, No. 2, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1982.
8. Dario, P., et al., Touch-Sensitive Skin Uses Piezoelectric Properties to Recognize Orientation of Objects, *Sensor Review*, October 1982, pp. 194—198.
9. Bejczy, A. K., Application of Fiber Optics to Robotics, *International Fiber Optics and Communications*, Vol. 1, No. 6, November 1980.
10. Bejczy, A. K., "Smart Hand" — Manipulator Control Through Sensory Feedback, *Report, JPL D-107*, January 15, 1983.
11. The mechanism of the force-reflecting hand controller was designed by J. K. Salisbury, Jr., Design Division, Mechanical Engineering Department, Stanford University, Stanford, California 1980.
12. Bejczy, A. K., and Salisbury, J. K., Jr., Kinesthetic Coupling Between Operator and Remote Manipulator, *Proceedings of ASME Computer Technology Conference*, Vol. 1, San Francisco, California, August 12—15, 1980; and Controlling Remote Manipulators Through Kinesthetic Coupling, *Computers in Mechanical Engineering*, Vol. 1, No. 1, July 1983, pp. 48—60.
13. Handlykken, M. and Turner, T., Control System Analysis and Synthesis for a Six-Degree-of-Freedom Universal Force-Reflecting Hand Controller, *Proceedings of the 19th IEEE Conference on Decision and Control*, Albuquerque, New Mexico, December 10—12, 1980.
14. Bejczy, A. K. and Handlykken, M., Experimental Results with a Six-Degree-of-Freedom Force-Reflecting Hand Controller, *Proceedings of the 17th Annual Conference on Manual Control*, UCLA, Los Angeles, California, June 16—18, 1981.
15. Bejczy, A. K. and Vuskovič, M., An Interactive Manipulator Control System, *Proceedings of the 2nd International Symposium on Mini- and Microcomputers in Control*, ACTA Publ., Anaheim, California, 1980.
16. Bejczy, A. K., Dotson, R. S., and Mathur, F. P., Man-Machine-Speech Interaction in a Teleoperator Environment, *Proceedings of Symposium on Voise Interactive Systems*, DOD Human Factors Group, Dallas, Texas, May 13—15, 1980.
17. Bejczy, A. K., Dotson, R. S., Brown, J. W., and Lewis, J. L., Voice Control of the Space Shuttle Video System, *Proceedings of the 17th Annual Conference on Manual Control*, UCLA, Los Angeles, California, June 16—18, 1981.
18. Bejczy, A. K. and Paine, G., Event-Driven Displays for Manipulator Control, *Proceedings of the 14th Annual Conference on Manual Control*, University of Southern California, Los Angeles, California, April 25—27, 1978.
19. Paine, G. and Bejczy, A. K., Extended Event-Driven Displays for Manipulator Control, *Proceedings of the 15th Annual Conference on Manual Control*, Wright State University, Dayton, Ohio, March 20—22, 1979.

Список дополнительной литературы

Baron, S. and Kleinman, D. C., The Human as an Optimal Controller and Information Processor, *IEEE Transactions on Man-Machine Systems, MMS-10*, 1, 1969, pp. 9—17.

Bejczy, A. K., Distribution of Man-Machine Controls in Space Teleoperation, SAE Aerospace Congress, *Behavioral Objectives in Aviation Automated Systems Symposium Proceedings*, Paper P-114-821496, October 25—28, 1982, Anaheim, California, pp. 15—27.

Bejczy, A., Kinesthetic and Graphic Feedback for Integrated Operator Control, *Proceedings of the Sixth Annual Advanced Control Conference*, April 28—30, 1980, Purdue University, West Lafayette, Indiana, pp. 137—147.

Bejczy, A. K., Performance Evaluation of Computer Aided Manipulator Control, *Proceedings of the IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics*, November 1976, Washington, D. C.

Bejczy, A., Sensors, Controls, and Man-Machine Interface for Advanced Teleoperation, *Science*, **208**, 1980, pp. 1327—1335.

Bejczy, A. K., Brooks, T. L., and Mathur, F. P., *Servomanipulator Man-Machine Interface Conceptual Design*, JPL Report No. 5030-507, U. S. Dept. of Energy, August 1981.

Bejczy, A. K., Effect of Hand-Based Sensors on Manipulator Control Performance, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 12, 1977, pp. 547—567, Pergamon Press.

Brooks, T., Superman: A System for Supervisory Manipulation and the Study of Human-Computer Interactions, *Master's Thesis*, Man-Machine Systems Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, May 1979.

Chu, Y., Chen, K., Clark, C., and Freedy, A., Analysis and Modeling of Information Handling Tasks in Supervisory Control of Advanced Aircraft, *Final Technical Report No. PETR-1080-82-5*, Perceptronics, Inc., Woodland Hills, California, May 1982.

Estabrook, N., Wheeler, H., Uhler, D., and Hackman D., Development of Deep-Ocean Work System, *IEEE Ocean '65*, 1979, pp. 573—577.

Ferrell, W. R. and Sheridan, T. B., Supervisory Control of Remote Manipulation, *IEEE Spectrum*, October 1967, **4**, 81—88.

Ferrell, W. R., Command Language for Supervisory Control of Remote Manipulation, in E. Heer (Ed.), *Remotely Manned Systems*, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1973, pp. 369—373.

Fyler, D. C., Computer Graphic Representation of Remote Environment Using Position Tactile Sensors, M. I. T., *Man-Machine Systems Laboratory Report*, Cambridge, Massachusetts, August 1981.

Groome, R. C., Force Feedback Steering of Teleoperator System, *MS Thesis*, Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics, Cambridge, Massachusetts, August 1977.

Handlykken, M., and Turner, T., Control Systems Analysis and Synthesis for a Six Degree-of-Fredom Universal Force-Reflecting Hand Controller, *Proceedings of the Nineteenth IEEE Conference on Decision and Control*, December 10—12, 1980, Albuquerque, New Mexico, pp. 1197—1205.

Hill, J. W. and Sword, A., Manipulators Based on Sensor Directed Control: An Integrated End Effector and Touch Sensing System, *Proceedings of the Seventeenth Annual Conference in Human Factors*, October 1979, Washington, D. C.

Hill, J. W., Study of Modeling and Evaluation of Remote Manipulation Tasks with Force Feedback, *Final Report For JPL, SRI Project 7696 JPL Contract 95-5170*, March 1979.

Jagacinski, R. J., and Miller, R. A., Describing the Human Operator's Internal Model of a Dynamic System, *Human Factors*, **20**(4), 1978, pp. 425—433.

Jelatis, D. C., Characteristics and Evaluation of Master-Slave Manipulators, *Performance Evaluation of Programmable Robots and Manipulators, NBS Special Publication 459*, October 1975, pp. 141—145.

Johnson, E. G. and Corliss, W. R., *Human Factors Applications in Teleoperator Design and Operation*, John Wiley & Sons, Inc., 1971.

Kohler, G. W., *Manipulator Type Book*, Verlag Karl Thiemig, Munchen, FRG, 1981.

Leifer, L., Sun, R., and Van der Loos, H. F. M., Terminal Device Centered Control of Manipulation for a Rehabilitative Robot, *Proceedings of Joint Automatic Control Conference*, 1980.

McCoy Winey III, C., Computer Simulated Visual and Tactile Feedback as an Aid to Manipulator and Vehicle Control, M. I. T., *Man-Machine Systems Laboratory Report*, Cambridge, Massachusetts, May 1981.

Nevins, J. L., Sheridan, T. B., Whitney, D. E., and Woodin, A. E., The Multi-Moded Remote Manipulator System, in E. Heer (Ed.), *Remotely Manned Systems*, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1973, pp. 173—187.

Okada, T., Object-Handling System for Manual Industry, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **SMC-9** (2), February 1979, pp. 79—89.

Person, L. H. and Steinmetz, G. G., The Integration of Control and Display Concepts for Improved Pilot Situational Awareness, *Proceedings of the 34th International Air Safety Seminar*, November 9—15, 1981, Acapulco, Mexico, pp. 122—130.

Setzer, W. and Vossius, G., On the Stability Problem of Human Arm and Hand Movements Controlling External Load Systems, *Proceedings of the First Annual European Conference on Manual Control*, May 25—27, 1981, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, pp. 243—253.

Sheridan, T. B., Supervisory Control: Problems, Theory and Experiment for Application to Human-Computer Interaction in Undersea Remote Systems, *M. I. T. Man-Machines Systems Laboratory Report*, Cambridge, Massachusetts, March 1982.

Sheridan, T. B., Supervisory Control of Remote Manipulators, Vehicles and Dynamic Processes: Experiments in Command and Display Aiding, *M. I. T. Man-Machine Systems Laboratory Report*, Cambridge, Massachusetts, March 1983.

Shultz, R. E., Tesar, D., and Doty, K. L., Computer Augmented Manual Control of Remote Manipulator, *Proceedings of the 1978 IEEE Conference on Decision and Control*, San Diego, California, January 1979.

Spiger, R. J., Farrell, R. J., and Tonkin, M. H., Survey of Multi-Function Display and Control Technology, *NASA Report No. CR-167510*, Boeing Co., 1982.

Stark, L. and Ellis, S. S., Revisited: Cognitive Models in Direct Active Looking, in *Eye Movement, Cognition and Visual Perception*, Fisher, Monty, and Senders (Eds.), Erlbaum Press, New Jersey, 1981, pp. 193—226.

Starr, G. P., Supervisory Control of Remote Manipulation: A Preliminary Evaluation, *Proceedings of the Seventeenth Annual Conference on Manual Control*, June 16—18, 1981, University of California, Los Angeles, California, pp. 95—107.

Starr, G. P., A Comparison of Control Modes for Time-Delayed Remote Manipulation, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **SMC-9** (4), 1979, pp. 241—246.

Stassen, H. G., Man as Controller, *Introduction to Human Engineering*, Koln: Verlag TUV, Rheinland, 1976.

Vertut, J., Experience and Remarks on Manipulator Evaluation, *Performance Evaluation of Programmable Robots and Manipulators*, NBS Special Publication 459, October 1975, pp. 97—112.

Vykukal, H. C., King, R. F., and Vallotton, W. C., An Anthropomorphic Master-Slave Manipulator System, in E. Heer (Ed.), *Remotely Manned Systems*, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1973, pp. 199—205.

Wagner, E. and Hanett, A., MINIMAC — the Remote-Controlled Manipulator with Stereo TV Viewing at the SIN Accelerator Facility, *Transactions of the American Nuclear Society*, Vol. 30, pp. 759—760, 1978.

White, T. N., Modeling the Human Operator's Supervisory Behavior, *Proceedings of the First European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control*, May 25—27, 1981, Delft University ot Technology, Delft, The Netherlands, pp. 203—217.

Yoerger, D. R., Supervisory Control of Underwater Telemanipulators: Design and Experiment, M. I. T., *Man-Machine Systems, Laboratory Report*, Cambridge, Massachusetts, August 1982.

Часть 4

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ РОБОТЫ

Глава 18

ЭЛЕМЕНТЫ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Л. Л. Холиншед, фирма «Цинциннати милакрон», г. Цинциннати, шт. Огайо

18.1. Введение

Программное обеспечение роботов представляет собой совокупность программ и связанных с ними данных, которые разрабатываются, производятся, продаются и сопровождаются для обеспечения функционирования промышленных роботов.

Настоящая глава представляет собой обзор программного обеспечения современных промышленных роботов. Вначале рассмотрена роль программного обеспечения в изготовлении роботов, их внедрении и эксплуатации. Затем описываются основные характеристики современных систем программного обеспечения роботов. Далее анализируются и иллюстрируются конкретными примерами основные возможности современных систем. В заключение описывается перспективная разработка системы программирования робота в автономном режиме — проект ИКАМ, заказанный ВВС США.

Для понимания этой главы требуется некоторое знание вычислительной техники и основ робототехники. Ответы на многие возникающие при чтении вопросы можно найти в других главах настоящего справочника. Можно также порекомендовать другую превосходную книгу — «Практикум по робототехнике» Дж. Энгельбергера [8].

18.2. Роль программного обеспечения промышленных роботов

Роль программного обеспечения промышленных роботов многогранна. Требования, предъявляемые к нему различными группами пользователей, зачастую противоречивы. Например, инженер, занимающийся роботизацией, должен располагать средствами разработки программного обеспечения и сервисными программами. Они позволяют ему выполнять свою работу быстро и эффективно. С другой стороны, сохранять эти средства в программном обеспечении робота, находящегося в промышленной эксплуатации, нецелесообразно. На этом этапе стремятся повысить эксплуатационные характеристики, надежность, безопасность, упростить эксплуатацию. Изготовитель роботов предъявляет свои требования, определенные особенностями изготовления робота, гибкости его конфигурации и гарантийного обслуживания. Таким образом, «роль» программного обеспечения промышленных роботов лучше всего рассматривать с трех точек зрения: специалиста по эксплуатации, разработчика роботизированной системы, производителя роботов.

Современный промышленный робот существует для участия в производстве промышленных товаров. В сущности все свое время он проводит за работой. Поэтому его программное обеспечение должно обеспечивать высокую производительность при стабильном качестве выполнения операций.

Кроме того, робототехническая система должна быть надежной и простой в эксплуатации. Простота эксплуатации обеспечивается программными управляющими процедурами, выдачей точной и полной информации о состоянии системы и возникающих в ней ошибках, простыми, но эффективными диагностическими функциями. На надежность системы влияют и аппаратура, и программное обеспечение. Программное обеспечение играет важную роль в обеспечении надежности системы — оно призвано обнаруживать сбои в работе оборудования, но, что еще важнее, оно само должно быть надежным. Необходимо глубже осознать роль надежности программного обеспечения и научиться создавать большие программные системы высокой надежности. Особенно это важно в робототехнике, где сбои программного обеспечения часто приводят к опасным ситуациям, а ликвидация их последствий может обойтись весьма дорого.

По мере настройки робота на выполнение той или иной операции важную роль приобретают различные множества выполняемых им функций. Программное обеспечение призвано облегчить составление при-

кладных программ, задающих вычисления и операции, которые робот должен выполнять в процессе производства. Очень важно, чтобы процессы обучения и программирования системы были достаточно простыми. Инженер-робототехник должен иметь простой и непосредственный доступ ко всем основным компонентам системы. Используемый в системе программирования роботов язык должен иметь средства описания структур данных, использования вычислительных ресурсов и соответствующего интерфейса с подсистемами очувствления. Для разработки управляющих программ, выполняющих те или иные задания, необходимы мощные отладочные средства. Наконец, системы программного обеспечения обычно включают в себя средства просмотра, документирования и архивации прикладных программ на внешних накопителях.

С точки зрения разработчика и производителя промышленных роботов на их программное обеспечение достаточно очевидны. Для производителя вопросы программного обеспечения важны потому, что робот со слабым программным обеспечением не будет иметь коммерческого успеха. Успех робота определяется не только удобством использования и мощностью, он зависит также от множества других, менее очевидных особенностей и характеристик программного обеспечения. Производитель предполагает, что программное обеспечение придаст его роботам максимальную универсальность и технологическую гибкость. Такой подход позволяет расширить сферу применения одного и того же робота, снижая себестоимость обрабатываемой им продукции. Одни и те же прикладные, обучающие, документирующие и сервисные программы могут эксплуатироваться всеми пользователями. В табл. 18.1, составленной по данным нескольких пользователей, перечислены изделия, при изготовлении которых использовалось унифицированное программное обеспечение.

Для снижения себестоимости производители роботов часто применяют микропроцессоры, а следовательно, и программное обеспечение. Например, в современных устройствах управления часто используется дисплей. Ввод команд с его клавиатуры позволил отказаться от дорогих пультовых переключателей и индикаторов. Микропроцессор взял на себя многие функции интерполяции и сервоуправления, сделав ненужным дорогое электронное оборудование.

Наконец, даже эксплуатация роботов может быть более эффективной, если используются программное обеспечение для автоматической диагностики в рабочем режиме

18.1. Программное обеспечение промышленных роботов

Фирма-изготовитель	Программное обеспечение	Изделие	Область применения
«Отомэтикс»	*AI32*/РЭЙЛ	Отовижн	Технический контроль
		Робовижн	Дуговая сварка
		Сайбервижн	Сборка
«Цинциннати милакрон»	«Акраматик» *V4*	*Т*3-726	Универсальный, мало[мощный]
		*Т*3-746/756	Технология
		*Т*3-566/586	Универсальный, мощны[й]
«Сайботекс»	*RC-6*	*V*15	Универсальный, маломощный
		P-15	Окраска
		*V*80, *G*80, *H*80	Универсальный, мощны[й]
ИБМ	*RS*/1/АМЛ	*RS*/1	Сборка

и программные средства настройки систе-мы, поставляемые ее разработчиком.

18.3. Современные системы программного обеспечения роботов

Системы программирования роботов мо[жно] классифицировать по способу их про[граммирования]. Боннер и Шин [3] опубли[ковали] сравнительное исследование языков программирования роботов, в котором дает-ся определение пяти классов программного обеспечения и рассматривается 14 систем. Лоцано-Перес [11] приводит глубокий ана-лиз требований к системам программиро-вания роботов и обзор существующих си-стем. Он выделяет три типа систем про-граммирования роботов: ориентированные на обучение, ориентированные на язык уп-равления роботом и ориентированные на описание операции.

В этой главе описывается программное обеспечение роботов первых двух типов по Лоцано-Пересу. Цеховые роботы с систе-мой программирования, ориентированной на обучение, выпускаются фирмами АСЕА, «Цинциннати милакрон», «Сайботекс», «Дженерал электрик», «Прэб» и «Юни-мейшн». В настоящей главе описывается ро-бот такого типа «Цинциннати милакрон 13»

[8]. Применение систем программирования, использующих язык управления роботом, описывается на примере систем РЭЙЛ фирмы «Отомэтикс» [1] и АМЛ фирмы ИБМ [10]. К этому типу относятся также роботы фирмы «Юнимейшн» (язык ВАЛ), «Дженерал электрик» (язык ХЕЛП) и манипуляторы фирма «Интернэшнлмэшин интеллидженс» (язык БЕЙСИК).

18.3.1. Цеховые роботы

Цеховые роботы используются чаще других. Их отличительная черта — простота использования. Они программируются методом проводки рабочего органа, иногда называемого «обучение показом». Интерфейс с пользователем разработан с ориентацией на обученных техников, эксплуатирующих робот на производственном участке.

Обучение осуществляется оператором, выполняющим набор несложных действий. Обычно схема управления роботом оформлена в виде «меню», нанесенного на панель пульта, на котором размещены функциональные выключатели и соответствующие индикаторы. Все системы данного типа включают в себя переносной пульт управления, который пользователь носит с собой, передвигаясь по рабочей зоне в процессе обучения.

Описание операции, выполняемой роботом, состоит из одного или более сегментов, каждый из которых представляет собой траекторию перемещения в пространстве. Эти сегменты могут быть сгруппированы (обычно посредством конкатенации) для формирования цикла. Цикл представляет собой высший уровень иерархии элементов операции. Отдельные части сегмента называются точками. Точка характеризуется геометрическими параметрами положения и ориентации инструмента, прикрепленного к манипулятору робота. С точкой может связываться и другая информация, характеризующая соответствующую часть сегмента. Например, каждая точка содержит информацию о том, с какой скоростью должен прийти к ней манипулятор, должен ли он остановиться в этой точке или плавно проследовать через нее и какие действия должны быть выполнены в ней (если это требуется). Кроме того, некоторые системы позволяют указывать вид интерполяции (прямая линия, дуга и т. д.), используемый при приближении к каждой точке.

Цеховые системы характеризуются тесной связью между геометрическим описанием операции и описанием управляющей последовательности.

18.3.2. Системы, ориентированные на язык программирования робота

Манипулятор робота входит в состав лингвистических систем программирования роботов в качестве периферийного устройства автоматизированной системы. Эти устройства могут распознавать окружающую обстановку, анализировать и выполнять вычисления, хранить и использовать производственную информацию и управлять действиями манипулятора или другого технологического оборудования. С одной стороны, они расширяют возможности манипулятора робота, делая его «интеллектуальным». С другой стороны, они придают ему роль рабочего органа — элемента системы более высокого уровня.

Описание задания для робота состоит из элементов данных и наборов программных модулей, написанных на языке программирования робота. Элементы данных описывают положения в рабочем пространстве робота, параметры (скорость движения, параметры управления сваркой и др.), а также другие величины, используемые при работе робота. Программные модули написаны пользователем на языке программирования высокого уровня и детально описывают последовательность операций, которые должен выполнить робот (вычисления, опрос датчиков, обработка информации и др.).

Основные положения информатики распространяются и на системы программирования роботов. Среди них наиболее важную роль играет разделение программы и данных. Если в цеховых роботах имеется однозначное соответствие между траекторией движения и логикой программы, то при управлении на языке программирования робота между ними есть очевидное различие. Геометрическая информация о перемещениях в рабочей зоне робота представлена в виде данных, которые обрабатываются программой. Реальная траектория движения манипулятора определяется последовательностью выполняемых операторов программы и данных, задающих параметры положения инструмента. Передача управления организуется с помощью современных операторов структурного программирования.

Влияние информатики просматривается и в других областях. Для передачи, хранения и поиска информации используются файлы данных. Для автоматизации разработки и документирования программ применяются традиционные программные средства.

Однако, несмотря на все преимущества лингвистических систем программирования роботов, их использование в промышленности затруднено. Как и любые другие мощные средства, они требуют обучения персонала и переосмысления задач. Поэтому они часто отвергаются производственниками под предлогом сложности понимания и использования.

18.3.3. Основные средства

Характеристики программного обеспечения роботов тесно связаны с выбранными изготовителем базовыми программными средствами и электронным оборудованием. Архитектура практически всех современных устройств управления представляет собой распределенную микропроцессорную систему, а программное обеспечение большинства роботов написано на языках программирования высокого уровня. Язык ассемблера используется, когда требуется высокая скорость выполнения (например, программные модули управления движением манипулятора) или когда приходится иметь дело с данными на уровне команд микропроцессора. В табл. 18.2 перечислены вычислительная техника и языки программирования, применяемые в большинстве современных роботов.

18.2. Программное обеспечение и вычислительная техника

Фирма-изготовитель	Управление	Язык программирования	МикроЭВМ
«Отомэтикс»	*AI*32	Паскаль, ассемблер	«Моторола» 68 000
«Цинциннати Милакрон»	«Акраматик» *V*4	ПЛ/М, ассемблер	«Интел» *iAPX* 85, 86
«Сайботекс»	*RC*-6	Ассемблер	«Интел» *iAPX* 86
«Дженерал электрик»	«Марк» *C* 2000	Паскаль, ассемблер	«Интел» *iAPX* 86
«Дженерал электрик»	«Аллегро» *A*12	Паскаль, ассемблер	«Диджитал экуипмент» *LSI*-11 «Интел» *iAPX* 85
ИБМ	*RS*/1	По желанию пользователя	ИБМ Серия 1
«Вестингауз»	*MCS*-60	ПЛ/М, ассемблер	«Интел» *iAPX* 85, 86
«Вестингауз»	*VAL*	Ассемблер	«Диджитал экуипмент» *LSI*-11

Операционные системы реального времени также входят в базовое программное обеспечение роботов. Например, в системе управления роботом «Вестингауз *MSC*-60» [14] в качестве ядра программного обеспечения используется операционная система *RMX*-86 фирмы «Интел». Такая стратегия дает изготовителям роботов следующие преимущества: стандартизация внутреннего интерфейса, ускорение разработки программного обеспечения, независимость программ от электронного оборудования. Раньше стандартные микропроцессорные системы реального времени были малопроизводительными и требовали больших затрат памяти. Однако ожидается, что с ростом быстродействия микропроцессоров и удешевлением элементов памяти, многие изготовители промышленных систем управления примут этот подход.

18.4. Основные элементы программного обеспечения роботов

Для описания основных функций программного обеспечения роботов они сгруппированы в 6 групп (рис. 18.1). Ниже эти группы рассматриваются подробно с примерами из современных робототехнических систем.

18.4.1. Общее управление

Блок общего управления, как элемент программного обеспечения промышленных роботов, отвечает за общее управление и координирует действия всей системы. Он управляет как внутренними модулями системы, так и синхронизацией с внешним оборудованием, связью с оператором, технологическим оборудованием и, возможно, связью с управляющей ЭВМ высокого уровня.

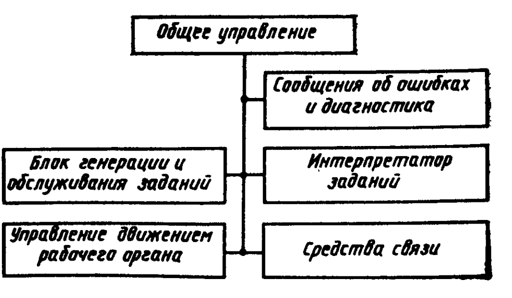


Рис. 18.1. Основные элементы программного обеспечения роботов

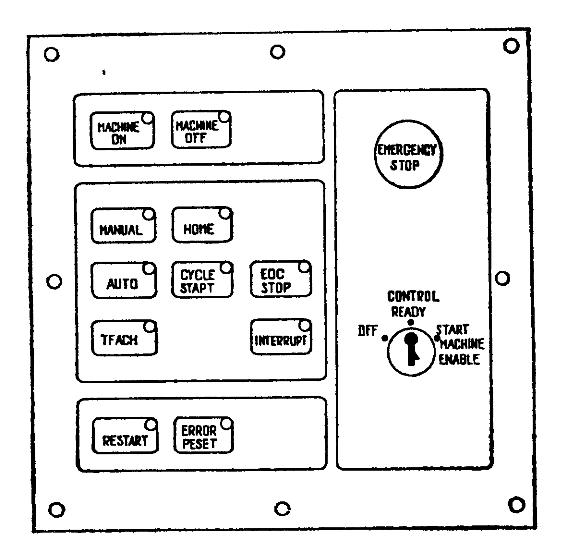


Рис. 18.2. Пульт управления роботом фирмы «Цинциннати милакрон» (с разрешения фирмы «Цинциннати милакрон»)

Блок общего управления включает в себя интерпретатор команд, который получает и обрабатывает команды оператора или центральной ЭВМ. Связь с оператором осуществляется с помощью пультовых переключателей и световых индикаторов или дисплея с клавиатурой. Кроме того, все робототехнические системы снабжаются переносным пультом управления с кнопками и индикаторами, с которым можно перемещаться по рабочей зоне. Любое обращение к блоку генерации и выполнения программ проходит через блок общего управления. Он же управляет выдачей сообщений об ошибках и печатью результатов.

18.3. Типовые параметры конфигурации

Положения входа-выхода
Характеристики устройства связи
Возможность замены инструмента
Возможность замены основания
Единицы калибрования осей
Используемая система единиц (метрическая, английская)
Временные характеристики
Объем памяти
Технологические параметры
Имя файла начальной загрузки

Кроме того, на уровне этого блока выполняется ряд вспомогательных операций. Одна из них — процедура генерации системы, которая настраивает программное обеспечение поставщика на особенности конфигурации пользователя (табл. 18.3). Другая — выполнение диагностических текстов с целью выявления ошибок оборудования или других сбоев системы. Составление отчета о производительности робота и техническое обслуживание данных также представляют собой вспомогательные функции блока общего управления.

Функции блока общего управления можно выделить и в цеховом оборудовании: когда требуется организовать взаимодействие с оператором во время работы, при обучении или при определении параметров системы в период настройки. Эти устройства, как правило, — простые пульты управления, а взаимодействие с оператором осуществляется с помощью меню.

Робот фирмы «Цинциннати милакрон» функционирует в одном из трех режимов: ручной, обучения и автоматический. Автоматический режим используется в процессе производства, а ручной для непосредствен-

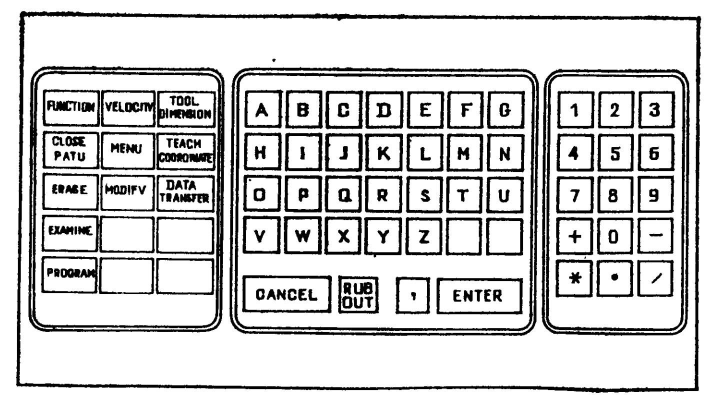


Рис. 18.3. Обучающий пульт робота фирмы «Цинциннати милакрон» (с разрешения фирмы «Цинциннати милакрон»)

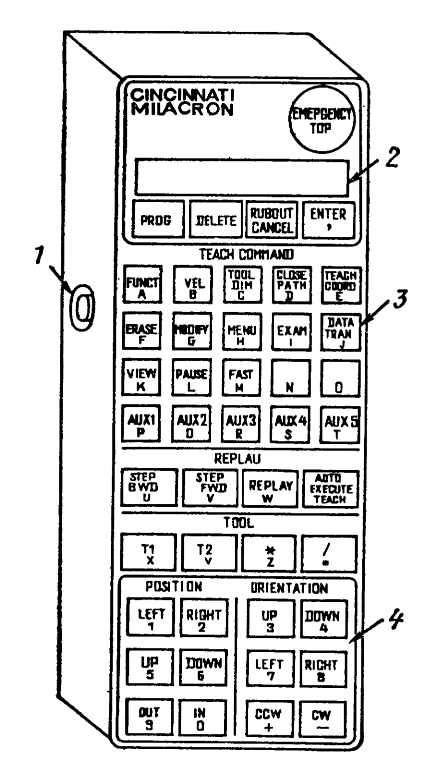


Рис. 18.4. Пульт-приставка робота фирмы «Цинциннати милакрон» (с разрешения фирмы «Цинциннати милакрон»):
1 — регулятор скорости движения; *2* — дисплей; *3* — клавиши режима обучения; *4* — клавиши управления движением

ного поосевого управления движением манипулятора с переносного пульта. Пульт управления (рис. 18.2) используется для запуска или остановки робота, для переключения режимов, сброса ошибок и т. д. Обучение и диагностика производятся с портативного видеотерминала, клавиатура которого изображена на рис. 18.3. Эти функции также можно выполнить с обучающей приставки (рис. 18.4), с которой, кроме того, производятся управление движением по осям и выполнение программ.

Функции блока общего управления при работе с языками программирования роботов относительно просты, так как большинство команд выполняется интерпретатором заданий (см. разд. 18.4.3).

18.4.2. Блок генерации и обслуживания заданий

Блок генерации и обслуживания заданий представляет собой набор средств для создания, отладки и обслуживания процедур и данных, относящихся к различным заданиям робота, формирование заданий происходит двумя способами, интерактивным (иначе называемым обучением показом или проводкой) или посредством написания программы на языке программирования робота. По мере развития систем автоматизированного проектирования (САПР) они могут брать на себя все больше и больше функций по формированию заданий. Так как программы для станков с ЧПУ сегодня в основной массе разрабатываются с помощью автоматизированных систем, можно предположить, что описание задания для робота тоже может генерироваться автоматически. В действительности в проекте ИКАМ ВВС США (см. разд. 18.5) уже сделаны шаги в этом направлении.

Тем не менее средства отладки составляют основную часть блока генерации и обслуживания заданий, и они безусловно сохранятся, пока программы, соответствующие заданиям роботов (или программы, которые генерируют задания для роботов!), пишутся людьми и пока промышленное оборудование не станет полностью автоматизированным. Средства отладки используются в трех основных направлениях. Они позволяют пользователю управлять и контролировать выполнение задания. С их помощью программы или данные могут быть отображены на дисплее и откорректированы. И, наконец, робот и связанное с ним оборудование могут быть подведены вручную и подготовлены для работы под управлением отдельного сегмента задания, находящегося в отладке.

Средства обслуживания заданий также включают в себя функции получения листинга и хранения программ и данных. Наиболее распространенным способом хранения заданий является их автономная запись на магнитную ленту или диск. С увеличением использования сетей связи управления от центральной ЭВМ будет также производиться хранение заданий на удаленных запоминающих устройствах. Кроме того, в данный блок входят средства представления заданий робота на бумаге (в виде графиков и табуляграмм).

Для цеховых роботов задания создаются путем проводки рабочего органа по всем сегментам траектории, при этом осуществляется ввод управляющих функций и других параметров. Дополнительная информация вводится с консоли. Например, обучающий пульт-приставка робота фирмы «Цинциннати милакрон» может применяться для проверки задания или для корректировки внутренних переменных и таблиц параметров.

Управление движением манипулятора с переносного пульта осуществляется либо по-

осевым способом, либо покоординатно. Перемещение обычно производится в координатах звеньев или в естественных (прямоугольных) координатах. Могут осуществляться также цилиндрические и связанные с инструментом перемещения. Задания редактируются путем проводки манипулятора по нужному участку траектории и ввода команд вставки, замены или удаления опорных точек. Изменения можно вводить с консоли без физического перемещения руки манипулятора.

Отладка производится путем выборочного выполнения отдельных шагов задания. Цеховые системы позволяют оператору выполнять задание пошаговым способом в прямом или в обратном направлении.

Задания могут отображаться по консоли или могут быть получены на устройстве печати в виде табуляграммы. Как правило, долговременное хранение производится на кассетах магнитной ленты, хотя в некоторых системах используется память на цилиндрических доменах.

В лингвистических системах программирования роботов задания создаются при первом вводе операторов программы с помощью текстового редактора, а затем, по необходимости, для определения положения опорных точек пользуются переносным пультом управления. После первичного задания программных модулей производится отладочный прогон задания (в случае необходимости — по шагам) с использованием видеотерминала для отображения и (или) модификации операторов или переменных. Так как эти системы интерпретирующего типа, то зацикливания в программах быстро и эффективно выявляются. Отлаженные программы выгружаются на магнитную ленту или диск.

Как правило, используются строковые текстовые редакторы. Основные операции — печать, вставка или удаление строк. Кроме того, имеются команды поиска фрагмента текста по заданному слову или фразе и замена его на новый. Средства редактирования фирмы ИБМ представляют собой процедуры системы редактирования, которые могут использоваться для построения программ, выполняющих автоматическое редактирование заданий.

Для задания геометрической информации с переносного пульта управления существуют специальные команды. Команда *LEARN* (язык фирмы «Отометикс») позволяет оператору задать точки, последовательности точек (траектории) или системы координат. Чтобы это сделать, следует ввести команды *LEARN* или *LEARN FRAME*; когда манипулятор робота займет нужное положение, следует нажать кнопку на переносном пульте управления — при этом координаты запоминаются. В языке АМЛ имеется аналогичная системная процедура *GUIDE*. При выполнении процедуры *GUIDE* оператор проводит манипулятор по намеченной траектории; нажатие клавиши *END* на переносном пульте управления вызывает завершение процедуры *GUIDE* и передачу текущих координат положения манипулятора в вызывающую программу.

Поскольку лингвистические системы программирования роботов обрабатывают геометрическую информацию одинаково и независимо от логики программы, можно формировать параметры положения аналитически или вводить их из альтернативного источника.

Мощность отладочных средств может колебаться в широких пределах — от простейших процедур пошагового исполнения до совершенных систем трассировки фирмы ИБМ. Пошаговый способ выполнения вызывает останов интерпретатора заданий после выполнения каждой команды. При этом оператор может проверить или модифицировать задание или рабочее положение перед выполнением следующей команды. Команда *SINGLESTEP* языка фирмы «Отометикс» применяется к каждому выполняемому оператору. Системная процедура *SINGLESTEP* фирмы ИБМ выполняется выборочно, только на заданном оператором уровне процедур. В обеих системах оператор может задавать точки остановки, а в программах на языке АМЛ можно использовать процедуру *BREAK*.

В языке АМЛ есть еще две системные отладочные процедуры. *TRACE* выводит расширенную информацию о выполнении каждого оператора на дисплей, печать или в дисковый файл. *WALKBACK* отображает оператор, выполненный перед приходом манипулятора в текущее положение.

18.4.3. Интерпретатор заданий

Интерпретатор заданий управляет пошаговым выполнением задания. Он производит выборку, анализ и инициализацию каждого шага выполняемого задания. Видимым результатом этого процесса является движение руки робота. Интерпретатор заданий должен также следить за событиями в реальном времени и использовать полученную информацию для управления выполнением задания. Кроме того, осуществляются связь с оператором и сбор производственной статистики.

В большинстве робототехнических систем используется интерпретация, а не компиляция описания задания. Использование режима интерпретации для цеховых машин вполне естественно, так как сначала необходимо представить во внутреннем виде, затем восстановить и повторить действия, выполняемые оператором. Применение интерпретатора дает много преимуществ поставщику роботов. Для интерпретатора достаточно простого, безопасного для пользователя интерфейса на уровне первичных элементарных операций возможно использование диалоговых средств отладки заданий, что дает разработчику возможность управлять выполнением задания во времени. Кроме того, задание представляется в компактной форме и меньше зависит от особенностей оборудования. Интерпретатор заданий цехового робота управляет его действием как в рабочем режиме, так и при повторении различных сегментов программы в процессе обучения. Процесс интерпретации тесно связан с геометрическими параметрами задания; другими словами, интерпретатор вызывает движение манипулятора по траектории от одной точки к другой. Шаг задания и перемещение от одной точки к другой практически не различаются. В случае необходимости в любой точке могут быть выполнены принятие решений, обмен данными или другие управляющие функции. Иногда возможно задание упреждающего управляющего воздействия, предшествующего приходу рабочего органа в запрограммированную точку. Знак времени упреждения определяет, когда должно быть осуществлено нужное воздействие: до или после достижения указанной точки.

Для увеличения гибкости интерпретаторы заданий цеховых машин могут «рассчитывать» более одной точки на траектории. Например, в системе «Сайботекс *RC-6*» [7] используется задаваемая точка цикла, разделяющая сегмент на участок подхода, по которому рабочий орган проводится однократно (в первый раз), и рабочую траекторию, движение по которой повторяется многократно. В системе «Цинциннати милакрон» сегменты могут включать в себя точки с индексом, разбивающие их на несколько коротких отрезков.

Предоставляемые этими интерпретаторами возможности принятия решений просты, но их достаточно для всех традиционных применений роботов. Как правило, они ограничены проверкой цифровых рабочих сигналов и внутренних двоичных признаков. В семействе роботов «Цинциннати милакрон *T3*» предусмотрена возможность работы с целыми переменными. При выполнении расчетов и принятии решений можно вычислить простейшие арифметические и логические выражения (рис. 18.5).

Могут предусматриваться некоторые средства обработки асинхронных событий. Однако цеховые роботы не имеют мощных возможностей по управлению и обработке

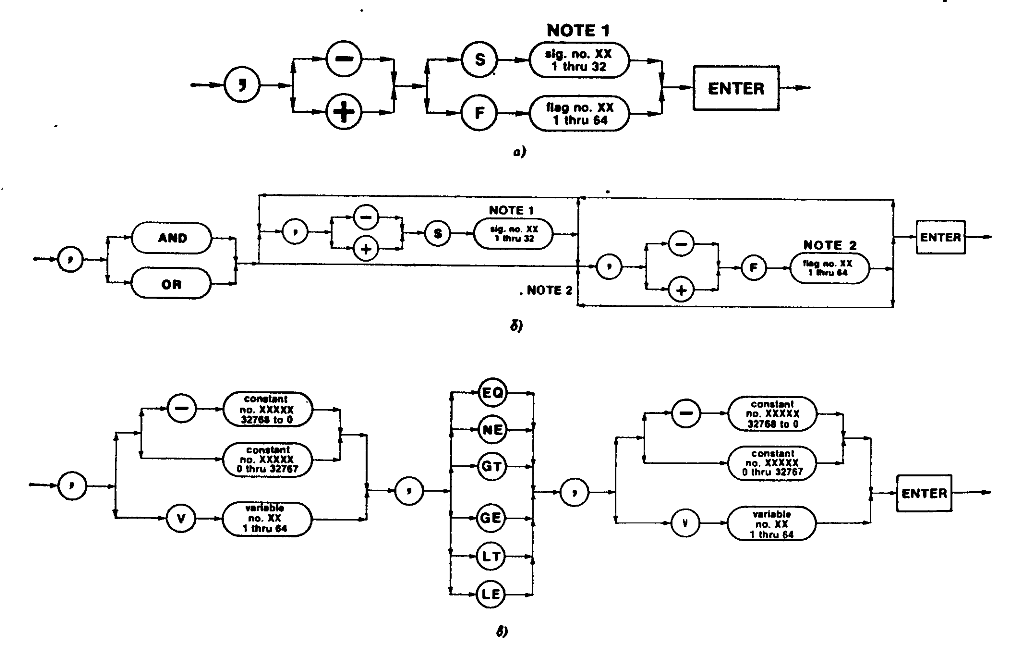


Рис. 18.5. Структурная диаграмма процесса принятия решений цехового робота:
а — одиночного; *б* — составного; *в* — с цифровым сравнением (с разрешения фирмы «Цинциннати милакрон»)

ошибок, включенных в язык АМЛ фирмы ИБМ (см. гл. 21).

Основой лингвистической системы программирования робота является интерпретатор. И если в цеховых роботах команды обучения и выполняемые команды задания различаются, то в лингвистических системах таких различий нет. Команды выполняются непосредственно после их поступления, а режим обучения мало отличается от рабочего режима. Более того, последовательности команд могут поступать с клавиатуры оператора, с диска или магнитной ленты или от удаленной ЭВМ.

Фирмы «Отомэтикс» и ИБМ придерживаются различных концепций построения лингвистических систем программирования. Фирма «Отомэтикс» выделила простой набор элементарных функций роботизированной сборки, сварки и технического зрения. Указанные функции реализованы операторами языка, очень похожего на популярный Паскаль.

Этот язык предоставляет пользователю простые, но достаточно мощные средства управления автоматическим оборудованием. На рис. 18.6 представлен фрагмент программы на языке РЭЙЛ.

Подход фирмы ИБМ основан на использовании базового языка программирования АМЛ и широкого набора системных процедур общего назначения. Они подразделяются на пять классов: управление и обработка ошибок, перемещение, слежение за процессами и датчиками, вычисления, обработка данных.

Объединяя стандартные процедуры и прикладные программы на языке АМЛ, можно описывать любые структуры данных и операции (рис. 18.7).

```
OUTPUT PORT CLAMP 3
INPUT PORT PART_READY 4

FUNCTION SEAM
  GLOBAL FIXTURE, SEAM1
  BEGIN
;
; SEAM is a function in which the robot welds
; a seam that is defined relative to a fixture.
;
    REPEAT
      MOVE SLEW HOME
      WAIT UNTIL PART_READY == ON
      CLAMP = ON
      APPROACH 50 FROM FIXTURE : SEAM1
      WELD FIXTURE : SEAM1 WITH SPEEDSCHED[2],
                WELDSCHED[2]
      DEPART 50
      CLAMP = OFF
    UNTIL CYCLESTOP == ON
  END
```

Рис. 18.6. Пример программы на языке РЭЙЛ (с разрешения фирмы «Отомэтикс»)

```
GOALS: STATIC << · · · >,< · · · >, · · · >; -- Aggregate of 10 goals
  MOVEIT:  SUBR;           -- Move arm to desired goal
    G:  NEW O;             -- Will contain goal number
    CODE:  NEW O;          -- Will contain completion code
    DISPLAY ('ENTER GOAL NUMBER →');-- Prompt
    G = CVTSN (  READ ( O , STRING( 5 ) ) );
                           -- Read the string just entered and convert
                           -- it to numeric; this is the goal number
    CODE = DOIT ( G );     -- Call DOIT to move the arm according
                           -- to the goal number; get completion code
    IF CODE NE O
      THEN RETURN ('NUMBER MUST BE BETWEEEN 1 and 10');
                           -- If DOIT detected an error,
                           -- quit with a message
    END;
```

Рис. 18.7. Пример программы на языке АМЛ (с разрешения фирмы ИБМ)

Различие между этими подходами к программированию поясним на следующем примере. Предположим, что манипулятор робота следует подвести к детали на большой скорости, после чего перевести его в точку захвата с малой скоростью. Команда *APPROACH* языка РЭЙЛ, обработанная интерпретатором, обеспечит возможность этого перемещения. Использование языка АМЛ потребует от пользователя написания процедуры на языке АМЛ, которая сначала должна вычислить положение и ориентацию рабочего органа при приближении к детали, а затем выдать команду *MOVE*. Команда языка РЭЙЛ проще в употреблении, а процедура на языке АМЛ предоставляет большую гибкость в определении того, каким образом следует выполнять приближение к детали.

В обоих языках предусмотрены управляющие структуры, используемые в современном структурном программировании, такие, как *IF ... THEN*, *WHILE*, *REPEAT*. Имеются данные различных типов, используемые для вычислений, накопления информации, связи с оператором и получении информации от датчиков. В языке РЭЙЛ имеются целые, вещественные, строчные и логические переменные и массивы. В языке АМЛ также используются целые, вещественные и строковые переменные, а сложные структуры данных, включая массивы, оформляются в виде составных переменных.

18.4.4. *Управление движением рабочего органа*

Блок управления движением рабочего органа представляет собой программное обеспечение реального времени, управляющее движением рабочего органа по командам интерпретатора. Наиболее распространенный способ представления движения рабочего органа — в терминах перемещений, т. е. движения в пространстве от точки к точке. Существует несколько способов управления этим движением. Наиболее простым является цикловое управление, когда все звенья перемещаются к своему очередному положению независимо. Другой метод, обычно применяемый для роботов, используемых для аэрозольной окраски, называется контурным управлением. Программа, реализующая контурное управление, в режиме обучения запоминает последовательность наборов угловых смещений звеньев, соответствующих смежным точкам траектории, и воспроизводит их во время работы. При другом, наиболее сложном и гибком способе управления, называемом отслеживанием траектории, происходит координация перемещений звеньев. Способы координации могут быть при этом различными, от простой синхронизации прихода звеньев в конечное положение до осуществления прямолинейных или криволинейных перемещений между точками.

При сварке применяется специализированное управление движением по траектории между двумя точками — синусоидальное «колебательное» перемещение. Существуют также адаптивные способы, использующие техническое зрение, ток дуги сварки рабочего органа или другие датчики, обеспечивающие движение по шву.

Хотя наибольшее распространение получило позиционное управление, были проведены исследования и по силомоментному управлению, которое необходимо при выполнении сварочных операций (см. [14]).

Программное обеспечение движения является наиболее важным элементом промышленных роботов, так как влияет на производительность всей системы. Два определяющих фактора — рабочая частота сервоуправления манипулятора и точность вычисления команд. Кроме того, дополнительного рассмотрения требуют случаи, когда программируемая траектория проходит через геометрически недоступное для рабочего органа место.

Цеховые роботы комплектуются современными средствами управления движением манипулятора. Скорость движения задается на интервалах между опорными точками, есть возможность пропорционально увеличивать или уменьшать ее. Движение манипулятора можно остановить в любой точке сегмента или плавно продолжить дальше (это зависит от конкретных геометрических и прочих ограничений). Кроме того, устройство управления роботом «Цинциннати Милакрон» может выполнять оптимизацию скорости всех перемещений и автоматическое управление скоростью.

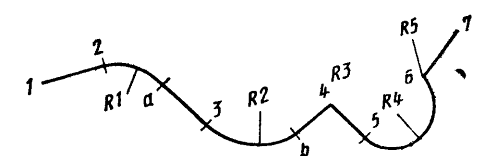


Рис. 18.8. Пример гибкой интерполяции траектории (с разрешения фирмы «Сайботекс»)

В случае независимого движения звеньев траектория движения между двумя точками получается сложной. Возможны два способа согласования перемещений (интерполяции). Линейная интерполяция применяется при прямолинейных перемещениях. Круговая интерполяция применяется при задании перемещений по криволинейным траекториям в режиме обучения. На рис. 18.8 изображена сложная траектория, которая при использовании круговой интерполяции может быть задана лишь семью точками. Многие современные цеховые системы могут управлять движением рабочего органа при сварке и обеспечивают адаптивное слежение за швом.

В программируемых робототехнических системах имеется программное обеспечение управления движением манипулятора. Его возможности аналогичны имеющимся в цеховых машинах. Однако различие в подходе к построению программ фирмы «Отомэтикс» (программы поставляются изготовителем) и фирмы ИБМ (программа разрабатывается пользователем) достаточно очевидны.

Программное обеспечение движения фирмы «Отомэтикс» обеспечивает прямолинейные перемещения, согласованные позвенные перемещения и перемещения при сварке. В системе имеется пропорциональное регулирование скорости, для каждой опорной точки или последовательности точек можно задать значение скорости. Интерпретатор языка РЭЙЛ позволяет просто и достаточно гибко задавать соответствующие параметры.

Программное обеспечение фирмы ИБМ строится по блочному принципу. Для перемещений задаются четыре параметра. Кроме возможности указания перемещаемого звена и определения конечных точек АМЛ имеет расширенные средства, позволяющие на этапе настройки управлять временем разгона, временем движения с постоянной скоростью и временем успокоения (используется для компенсации задержек). И хотя в большинстве робототехнических систем значения этих параметров зафиксированы в программах управления движением, про-

граммисту на АМЛ предоставляется возможность их явного задания.

Система управления *RS/1* фирмы ИБМ обеспечивает согласованное управление движением манипулятора и синхронизацию прихода звеньев в конечное положение. Однако способ интерполяции движения между точками (линейная, круговая или иная) задается пользователем. В состав системы входят мощные средства управления, подключаемые на разных стадиях движения.

18.4.5. Средства связи

Программное обеспечение средств связи обеспечивает взаимодействие управляющего программного обеспечения с устройствами оператора, с технологическим оборудованием, и, в случае необходимости, с центральной ЭВМ.

Связь с оператором необходима для выдачи команд или запроса информации, для вывода сообщений о состоянии системы и для исправления ошибок. Обычно устройства связи включают в себя видеотерминал, переносной пульт для обучения и устройство печати. На пульте управления оператора любого робота имеется несколько переключателей и индикаторов.

Кроме того, технологическое оборудование, входящее в состав большинства роботизированных систем, также требует связи с устройством управления. Наиболее просто эта связь организуется через последовательный интерфейс ввода-вывода системы управления роботом. Если количество необходимых для функционирования асинхронных команд велико или передается много цифровых данных, может использоваться отдельное программируемое устройство управления. В любых случаях программное обеспечение средств связи должно предоставлять возможность интерпретатору заданий и другим элементам программного обеспечения устанавливать или сбрасывать сигналы и получать информацию об их текущем состоянии. Другая функция программного обеспечения связи — обработка внешних прерываний и асинхронных событий. Кроме того, программное обеспечение связи используется и при работе с периферийными устройствами: накопителями, иа которых хранятся программы и данные, датчиками и вспомогательными устройствами управления, например сварочными или зрительными подсистемами.

По мере роста автоматизации технологических процессов организация связи роботов с центральной ЭВМ становится насущной необходимостью. Томас [15] выделяет 12 требований к системе иерархического управления роботами (табл. 18.4). Эти требования относятся к программному обеспечению средств связи, но косвенно влияют и на большинство других элементов программного обеспечения современных роботов. Фуссел [9] приводит функциональное описание устройства управления роботом, предназначенного для эксплуатации в составе производственной ячейки.

18.4. Характеристики средств связи (с разрешения «Цинциннати милакрон»)

Высокая скорость передачи информации, не менее 9600 бод
Стандартный протокол
Контроль надежности
Немедленная передача сообщений
Возможность телезагрузки
Возможность удаленной модификации заданий в процессе выполнения
Удаленное управление рабочим циклом
Удаленная модификация переменных и режима ввода-вывода
Выдача сообщений о состоянии
Выдача сообщений о положении
Передача сообщений об ошибках центральной ЭВМ
Выработка реакции на ошибки центральной ЭВМ

Возможности средств связи устройства управления «Цинциннати милакрон *T3*» типичны для цеховых роботов. В состав этих роботов входят пульт оператора, видеотерминал, обучающий пульт и кассетный накопитель на магнитных лентах (см. рис. 18.3—18.5). Простой пульт управления с 12-ю кнопками и переключателями позволяет вводить основные команды. Устройство связи с оператором — видеотерминал с длиной строки 80 позиций и полной алфавитно-цифровой клавиатурой. Так как весь процесс обучения робота [Цинциннати милакрон» выполняется с переносного пульта, это устройство снабжено 42 переключателями и 12-символьным алфавитно-цифровым дисплеем. На кассетной магнитной ленте можно хранить как задания пользователя, так и системное программное обеспечение. Цифровая подсистема обработки сигналов поддерживает передачу входной и выходной информации блоками по 8 разрядов.

Некоторые цеховые системы располагают средствами связи робота с управляющей ЭВМ. Но пока их возможности не используются большинством компонентов системы программного обеспечения.

Как и цеховое оборудование, аналитически программируемые робототехнические системы имеют программное обеспечение средств связи с оператором, цифровым контроллером ввода-вывода и периферийным оборудованием. Однако связь с периферийным оборудованием организована более гибко.

Устройство управления «Отомэтикс *A132*» рассчитано на подключение 6 устройств: видеотерминала, обучающего пульта-приставки, двух накопителей, серийного порта общего назначения *RS-232C* и модема. С любым из этих устройств может быть установлена связь. Кроме того, есть возможность переназначить устройство ввода-вывода по команде *ATTACH* с видеотерминала. Эта возможность может использоваться для управления *A132* с удаленного терминала через блок модема или программами разгрузки с управляющей ЭВМ.

Программы на языке АМЛ могут устанавливать связь с видеотерминалом, печатающим устройством, локальной сетью связи, гибким или постоянным диском. Все операции ввода-вывода ориентированы на работу с файлами с фиксированной длиной записи, задаваемой пользователем. Обеспечиваются операции чтения, записи и печати (при печати производится преобразование информации в символьный формат). Связь с тем или иным устройством устанавливается с помощью канального процессора.

18.4.6. Сообщения об ошибках и диагностика

Хорошо продуманная система диагностики и сообщений об ошибках — существенная часть программного обеспечения робототехнических систем. Она выполняет четыре функции. Диагностическое и наладочное программное обеспечение используется в производстве и настройке роботов. Когда на устройство управления подается электрическое напряжение, выполняется процедура автодиагностики. Ее целью являются проверка готовности системы к работе и поиск возникших неполадок. Следящее программное обеспечение сохраняет активность на всем протяжении работы робота. Оно обнаруживает возникающие сбои и останавливает движение манипулятора в случае возникновения опасности. В состав диагностического программного обеспечения часто включают программы, облегчающие поиск и устранение неисправностей.

Главной задачей функционирования программного обеспечения диагностики сообщений об ошибках является безопасность, т. е. защита оператора от травм и оборудования от повреждений. Оно также выполняет поиск и расшифровку ошибок программиста или оператора. Хорошие средства диагностики снижают производственные затраты. Они также ускоряют проведение ремонтных и профилактических работ, увеличивая срок службы и снижая затраты на техническое обслуживание робота.

Во всех цеховых системах имеются средства выдачи сообщений об ошибках и диагностики. Диагностические процедуры представляют собой часть управляющей системы и инициируются автоматически с включением питания. Как правило, эти программы локализуют места возникновения ошибок до уровня типового элемента замены (обычно печатной платы). Когда ошибка обнаружена, выдается сообщение оператору. Диагностические процедуры используются как в процессе производства, так и в течение всего времени эксплуатации робототехнической системы.

Система автодиагностики при запуске робота «Цинциннати милакрон» [5] может служить примером средства обеспечения надежности распределенной микропроцессорной системы управления роботом. Назначение этой системы диагностики — предупреждение аварийных ситуаций при работе системы и сокращение времени восстановления. Эти средства инициируются при включении и при изменении режима работы. Они выполняются в три этапа, называемых уровнями. Тестирование на уровне 1 заключается в автономной проверке всех микропроцессорных плат и некоторых перекрестных проверках для подтверждения прохождения проверки плат на данном уровне. На 2-м уровне тестирования проверяются каналы связи микропроцессорных устройств. Средства программного обеспечения диагностики уровня 1 и уровня 2 хранятся в ПЗУ, расположенных на платах. Диагностические средства уровня 3 требуют предварительной загрузки операционной системы робота и занимаются проверкой внешнего оборудования, состав которого может изменяться. Результаты этих проверок индицируются на четырех светодиодах, расположенных на торцах плат. Если диагностика определенного уровня завершилась успешно, то подсвечивается соответствующий светодиод. Обратите внимание, что при этом соблюдается внутренняя иерархия управления. Плата не может сформировать сигнал о завершении проверки, пока все подчиненные ей платы не сообщат о завершении проверки на данном уровне.

Программное обеспечение, управляющее выдачей сообщений об ошибках на этапах обучения и работы, составляет значительную часть общего программного обеспечения. Например, в руководстве по эксплуатации робота «Цинциннати милакрон» [6] приведено около 650 кодов ошибок восьми классов; более 200 из них описывают ошибки программирования и почти 100 — ошиб-

ки рабочего режима. Выдача состояния об ошибке требует выполнения, как минимум, одного программного теста; таким образом программы обработки ошибок составляют значительную часть всего программного обеспечения.

Средства обнаружения ошибок и диагностики в лингвистических системах программирования роботов аналогичны описанным выше. Однако диагностические средства языка АМЛ обладают большей гибкостью. Процедуры обработки ошибок могут по желанию пользователя (кроме случаев, когда манипулятор робота всегда останавливается при возникновении опасной ситуации) реагировать на ошибки произвольным образом. При обнаружении ошибки инициируется выбранная процедура обработки ошибки, и ей передаются код ошибки и другая необходимая информация. Пользуясь этими данными и разработанным фирмой ИБМ файлом диагностических сообщений на системном диске, пользователь может адекватно реагировать на ситуацию. Так как нежелательно пользоваться одной процедурой для обработки всех ошибок, программа на АМЛ может вызывать другие диагностические процедуры. С каждой структурной единицей выполняемого задания может быть связана определенная процедура обработки ошибок.

18.5. Автономный подход (проект ИКАМ ВВС США)

ВВС США руководит многими исследовательскими проектами, направленными на разработку комплексных управляемых ЭВМ серийных производственных систем для аэрокосмической промышленности. Один из таких проектов (ИКАМ) был начат в 1978 г. Он включал исследования по языкам аналитического программирования для участка роботизированного производства. Первая значительная работа по созданию языка, названного МЦЛ (язык управления производством), была сделана компанией «Мак-Доннелл Дуглас отомэйшн» в США [12].

Аналитическое программирование в целом и система МЦЛ, в частности, призваны снять ряд недостатков других методов программирования роботов для серийного производства. Когда приходится иметь дело с большим количеством деталей (и, следовательно, с большим количеством заданий для робота), затраты на программирования становятся значительными. Методика аналитического программирования позволяет формировать задания для роботов с использованием мощных ЭВМ и развитых программных средств. Процесс создания заданий исключается из сферы производства, что повышает производительность робота и связанного с ним оборудования. Применение МЦЛ уменьшает потребность в использовании конкретных изделий или моделей на этапе обучения. Это позволяет увеличить степень параллельности процесса автоматизации.

Хотя языки программирования роботов (см. разд. 18.3) могут использоваться и в автономном режиме, большое значение проекта ИКАМ состоит в том, что он разрабатывался для совместной работы с систе-

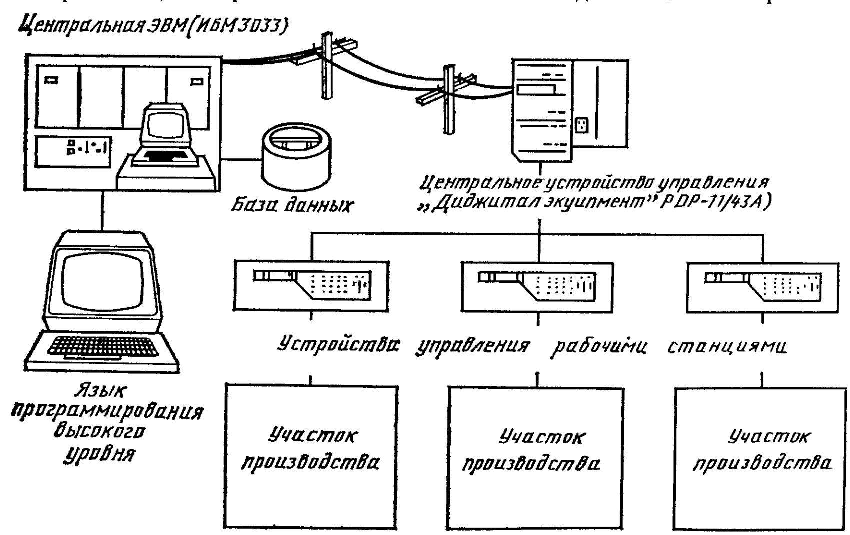


Рис. 18.9. Структура системы МЦЛ (с разрешения ВВС США)

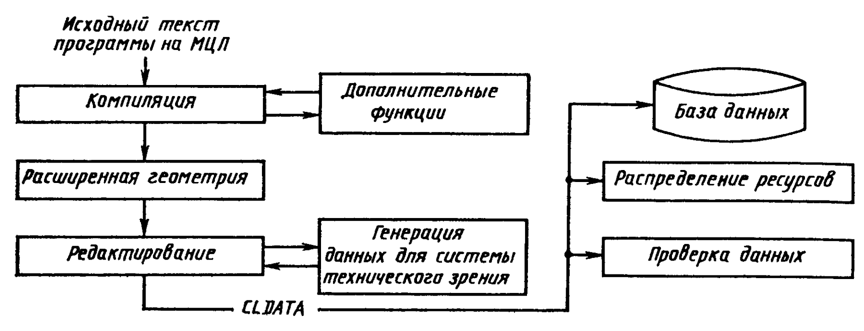


Рис. 18.10. Организация системы МЦЛ (с разрешения ВВС США)

мами САПР/АСТПП. Более того, язык был приспособлен для совместной работы любого типа робота со специальным технологическим оборудованием. В отличие от получивших широкое распространение систем технического зрения, система МЦЛ предполагает использование аналитических моделей [2] в качестве первого шага к практическому применению систем очувствления, интегрированных в САПР.

Система МЦЛ (рис. 18.9 и 18.10) состоит из трех основных компонент. Центральная ЭВМ имеет мощный центральный процессор, который выполняет компиляцию описаний на языке МЦЛ и ведет базы данных САПР, подсистем зрительного очувствления и АСУ.

Программа создается в результате компиляции исходного текста и составления геометрических описаний в диалоговом режиме. В результате формируется файл в формате *CLDATA*, содержащий полное описание задания, выполняемого производственной ячейкой. Затем описание задания передается центральному управляющему устройству на производственном участке. Центральное устройство управления выполняет предварительную обработку полученной информации и управляет работой ячеек, осуществляющих технологические операции. Предварительная обработка заключается в проверке и преобразовании описания задания в набор команд, выполняемых ячейками. В рабочем режиме центральное устройство управления передает эти команды устройствам управления ячейками и осуществляет общее управление ими.

Язык МЦЛ разработан на основе стандартного языка программирования АПТ, используемого в авиакосмической промышленности и других отраслях, где применяется раскрой металла. В АПТ имеются средства описания геометрических характеристик и перемещений. МЦЛ расширен средствами задания геометрической информации для обеспечения взаимодействия со зрительными подсистемами, средствами принятия решений общего назначения, средствами задания положений в нескольких связанных системах координат и средствами управления. Особенностями языка являются использование стандартных управляющих структур, обработка множественных асинхронных процессов, обработка чисел с плавающей точкой, логических и строчных данных. В языке имеются средства макрообработки.

Работы по МЦЛ проводились в начале исследований по ИКАМ, направленных на разработку технологии автономного программирования. В дальнейшем с ВВС США были заключены контракты на продолжение исследований в данной области, кроме того, ведутся исследования и по другим проектам (см. гл. 20). С развитием технологии компьютеризированного производства будут развиваться и другие методы автоматизации составления заданий для роботов. И, соответственно развиваясь, программное обеспечение промышленных роботов будет отвечать потребностям интегрированного промышленного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Automatix, Inc., RAIL Software Reference Manual: ROBOVISION and CYBERVISION, Automatix, Inc., Billerica, Massachusetts, 1982.
2. Baumann, Erwin W., Model Based Vision and the MCL Language, McDonnell Douglas Corp., Saint Louis, Missouri, 1981.
3. Bonner, S. and Shin, K. G., A Comparative Study of Robot Languages, *IEEE Computer*, December 1982, pp. 82—96.

4. Carter, W. C., Modular Multiprocessor Design Meets Complex Demands of Robot Control, *Control Engineering*, March 1983.
5. Cincinnati Milacron, Inc., *ACRAMATIC Version 4.0 Control Manual*, Cincinnati Milacron, Inc., Lebanon, Ohio, 1982.
6. Cincinnati Milacron, Inc., *Operating/Teach Manual for T3 Robots*, Cincinnati Milacron, Inc., Lebanon, Ohio, 1982.
7. Cybotech, Inc., *Cybotech V80 Robot System Operation Manual*, Cybotech, Inc., Indianapolis, Indiana, 1981.
8. Engeleberger, Joseph F., *Robotics in Practice*, AMACOM, 1980.
9. Fussell, Paul et al., *A Design of a Controller as a Component of a Robotic Manufacturing System*, Carnegie-Mellon University Robotics Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, 1982.
10. IBM Corporation, *IBM Robot System/1 AML Concepts and User's Guide*, IBM Corp., Boca Raton, Florida, 1981.
11. Lozano-Perez, Tomas, *Robot Programming*, Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, AI Memo 698a, February 1983.
12. McDonnell Douglas Corporation, *Robotic System for Aerospace Batch Manufacturing, Task B High Level Language User Manual*, Saint Louis, Missouri, 1981.
13. Oldroyd, L. Andrew, MCL: An APT Approach to Robotic Manufacturing, *SHARE 56*, March 1981.
14. Paul, Richard P., *Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control*, M. I. T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1981.
15. Thomas, A., D., *Flexible Automated Manufacturing with Computer-Controlled Robots under Hierarchical Control: Requirements and Benefits*, Cincinnati Milacron, Inc., Lebanon, Ohio, 1982.

Глава 19
ПРОГРАММИРОВАНИЕ РОБОТОВ В РЕЖИМЕ ОБУЧЕНИЯ

М. П. Дейзенро, Мичиганский технологический университет, г. Хоутон, шт. Мичиган

19.1. Основные понятия программирования в режиме обучения

Сегодня промышленный робот представляет собой в первую очередь автоматическое устройство, предназначенное для перемещения деталей и инструментов по заданным траекториям в нужной последовательности. По мере повторений рабочего цикла может возникнуть необходимость изменить последовательность или параметры выполняемых действий (например, из-за изменения внешних условий). Кроме того, при изменении конфигурации роботизированной ячейки или смене изделия может потребоваться, чтобы однотипный (а может быть, и тот же самый) робот выполнял совсем другое задание, включающее в себя другие перемещения и операции. Управляющая программа робота должна позволять смену выполняемых роботом заданий и предоставлять средства для диагностической модификации действий в пределах каждого задания. До некоторой степени, технологическая гибкость робота определяется совокупностью типов перемещений и операций, из которых составляется программа управляющего устройства, и степенью сложности ввода и модификации этой программы.

Программирование в режиме обучения представляет собой один из способов ввода управляющей программы в устройство управления роботом. В этом режиме оператор вручную проводит манипулятор робота по задаваемым траекториям, заставляя его выполнять все необходимые действия. Кроме того, оператор следит за правильностью перемещений и работой вспомогательного технологического оборудования. Процесс обучения включает в себя собственно обучение, редактирование и воспроизведение запомненных действий. Информация об элементах движения и сведения о выполняемых действиях записываются в память устройства управления в процессе проводки манипулятора по траектории. В отдельных точках траектории оператор может задать последовательность действий вспомогательного технологического оборудования, выполняемых в рабочем пространстве робота. Редактирование программы служит для введения в нее дополнительной информации как о перемещениях манипулятора, так и о действиях вспомогательного оборудования. Кроме того, редактирование позволяет исправлять ошибки в существующей программе и изменять ее, приспосабливая к изменениям внешних условий или смене выполняемого задания. В процессе обучения может возникнуть необходимость прогона различных сегментов программы для визуальной проверки выполняемых перемещений и действий. Может предусматриваться воспроизведение запомненных действий как в прямой, так и в обратной последовательности, по шагам, а также со скоростью, указанной оператором.

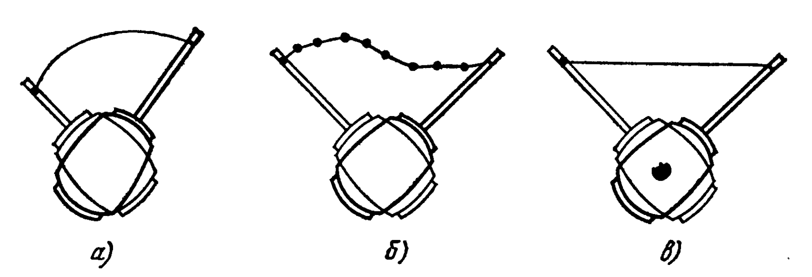


Рис. 19.1. Алгоритмы управления движением определяют траекторию перемещения манипулятора робота в режиме воспроизведения:
а — цикловое управление; *б* — позиционное управление; *в* — контурное управление

Идеология программирования в режиме обучения во многом определяется алгоритмами, осуществляющими управление движением манипулятора по заданным траекториям. Поэтому следует сказать несколько слов о трех основных алгоритмах управления.

Манипуляторы роботов с цикловым управлением перемещаются между заданными опорными точками по произвольным траекториям и с произвольной скоростью. Звенья манипулятора, соответствующие степеням его подвижности, перемещаются в пространстве с максимальной или ограниченной скоростью до тех пор, пока не придут в заданные положения. Хотя все звенья манипулятора движутся одновременно, это не означает, что и моменты завершения их перемещений совпадут. На рис. 19.1, *а* изображена траектория перемещения манипулятора робота с цикловым управлением. Позиционное управление предполагает воспроизведение движения манипулятора через последовательность недалеко отстоящих друг от друга опорных точек, запомненных в процессе проводки по траектории. В каждой опорной точке устройство управления запоминает положения всех звеньев манипулятора, опрашивая внутренние датчики их положения. Отстояние опорных точек определяется задаваемым интервалом времени между двумя опросами датчиков, осуществляемых в процессе движения по запоминаемой траектории.

В режиме воспроизведения это движение повторяется. На рис. 19.1, *б* представлена траектория перемещения манипулятора робота с позиционным управлением. Контурное управление предполагает согласование перемещений всех звеньев при движении манипулятора по траектории между двумя опорными точками. При использовании этого алгоритма управления все звенья перемещаются плавно и согласованно, что позволяет манипулятору в целом плавно двигаться по заданной траектории. На рис. 19.1, *в* изображена траектория перемещения рабочего органа робота с контурным управлением по прямолинейной траектории, соединяющей две опорные точки.

Проводка манипулятора по траектории в режиме обучения может осуществляться одним из двух следующих способов:

1) с использованием пульта-приставки. Обучающий пульт-приставка представляет собой портативное устройство, которое оператор в процессе ввода программы держит в руке. На пульте расположены переключатели и кнопки, подающие в устройство управления команды позиционирования. Как правило, пульт-приставка используется для составления программ роботов с цикловым и контурным управлением;

2) проводкой манипулятора. Как правило, для роботов с позиционным управлением используется задание траектории движения путем проводки манипулятора вручную. Оператор держит в руке рукоятку, механически связанную с манипулятором, и с ее помощью перемещает манипулятор, выполняя им все перемещения и действия, входящие в состав задания. Составление программ проводкой часто ис-

пользуется в роботизированных системах окраски распылением и дуговой сварки. Возможно использование этого способа и для составления программы робота с позиционным управлением.

Независимо от того, каким способом выполняется обучение, при составлении программы должны выполняться следующие действия.

Определение координат опорных точек и их запись в устройство управления робота. Опорные точки могут храниться в виде совокупности координат звеньев манипулятора или абсолютных координат центра инструмента.

Определение и запись в устройство управления информации о действиях, выполняемых в той или иной опорной точке. Эта информация может относиться не только к опорной точке (например, включение распылительной головки, ожидание сигнала от внешнего датчика), но к некоторому участку траектории (например, скорость перемещения электрода вдоль шва при дуговой сварке).

Группирование координат и информации о действиях в структуры, соответствующие последовательностям, составляющим задание. При этом определяется, какие участки траектории должен проходить манипулятор при тех или иных условиях, и в каких точках следует эти условия проверять.

Перечисленные действия тесно переплетены между собой и не могут рассматриваться как отдельные этапы процесса обучения. При использовании пульта-приставки оператор последовательно переходит от одной опорной точки к другой, в каждой из них записывая информацию о координатах и выполняемых действиях. Последовательность выполнения действий определяется порядком ввода опорных точек.

Использование режима обучения — наиболее естественный способ составления программ для промышленных роботов. При составлении программы оператор может свободно перемещаться в пределах роботизированной ячейки, выбирая наиболее удобную точку наблюдения. Устройство управления ограничивает скорость перемещения манипулятора в целях обеспечения безопасности оператора. Достаточно просто осуществляется синхронизация действий робота и вспомогательного технологического оборудования. В ходе воспроизведения ранее составленной программы оператор может ее отредактировать. Полученная в результате редактирования программа хранится в памяти устройства управления робота.

Следует отметить, что для составления программ в режиме обучения не требуется высокой квалификации оператора. Этому способу можно быстро обучить любого рабочего, даже не имеющего специальной подготовки в области робототехники. При этом не требуется изучать какого-либо языка программирования. Это позволяет привлекать к составлению программ выполнения каких-либо операций рабочих, наиболее квалифицированно и качественно выполняющих их традиционными способами. Лучший программист для робота с распылительной головкой — опытный маляр, а сварочного робота — сварщик. Составление программ перемещения деталей по силам даже низкоквалифицированным рабочим.

В режиме обучения можно составлять и редактировать программы с минимальными затратами времени. Современные устройства управления позволяют просто запрограммировать такие распространенные операции, как укладывание деталей в штабель и сопровождение конвейера. Хранящиеся на внешнем носителе программы можно загружать в устройство управления для модификации — приспособления к работе с деталями другой формы или с новым расположением вспомогательного оборудования, изменения последовательности действий. Наиболее часто используемые последовательности действий можно выделить в отдельные подпрограммы, к которым можно обращаться по мере надобности из различных программ.

Недостатки метода составления программ в режиме обучения связаны с необходимостью пользоваться роботом и поточным способом задания управляющей информации. Поскольку программирование выполняется с помощью оборудования роботизированной ячейки, время, затраченное на него, отрывается от промышленной эксплуатации. Если это время невелико, то им можно пренебречь, но, к сожалению, оно может быть и достаточно продолжительным. Если программа содержит много опорных точек и имеет сложную структуру с ветвлениями и точками принятия решений, то использование режима обучения может привести к значительному простою оборудования. В этом случае более эффективна методика аналитического программирования (см. гл. 20 и 21).

Программирование в режиме обучения на протяжении многих лет было основной методикой составления программ для промышленных роботов, и сегодня ему уделяется большое внимание. По-видимому, и в будущем его роль в этой области останется решающей. Аппаратные средства, обеспечивающие режим обучения, постоянно совершенствуются и позволяют с минимальными затратами создавать эффективные программы для роботов.

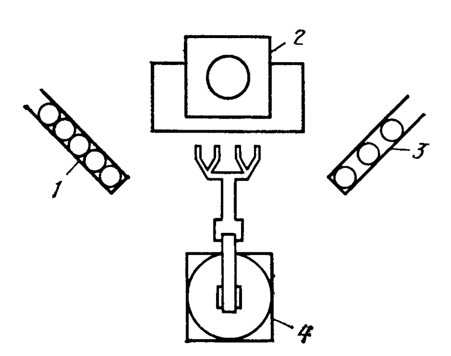


Рис. 19.2. К примеру составления управляющей программы робота с помощью пульта-приставки:

1 — транспортер с заготовками; *2* — обрабатывающий центр; *3* — транспортер с готовыми деталями; *4* — манипулятор робота

19.2. Основные приемы программирования с помощью пульта-приставки

Как уже упоминалось, в этом режиме программирование осуществляется за счет задания перемещений манипулятора робота в рабочем пространстве по командам, подаваемым оператором с переносного пульта-приставки. Рассмотрим пример (рис. 19.2). Робот должен брать заготовки с транспортера, расположенного слева от него, устанавливать их на обрабатывающий центр, а затем переносить готовые детали на транспортер, расположенный справа. Сдвоенный захват позволяет выполнять снятие готовой детали и установку заготовки практически одновременно. Устройство управления роботом связано с устройствами управления обрабатывающим центром и обоими транспортерами.

Оператор по шагам проводит робот по всему циклу, записывая каждое выполняемое перемещение в память устройства управления роботом. По завершении ввода координат точек вводится дополнительная информация о параметрах движения и выполняемых действиях. Пульт-приставка используется для задания перемещений робота, а информация о выполняемых действиях может вводиться с клавиатуры видеотерминала устройства управления. До начала программирования следует убедиться в том, что к устройству управления робота присоединены устройства управления вспомогательным оборудованием. После того как подготовительные операции выполнены, можно приступать непосредственно к вводу программы.

19.2.1. Задание координат опорных точек

Шаг 1. Перемещаем манипулятор робота до тех пор, пока левый захват не окажется над деталью, находящейся на конце входного транспортера, и раскрываем его.

Шаг 2. Совмещаем ось захвата с осью заготовки.

Шаг 3. Записываем выполненные перемещения, нажимая на пульте-приставке кнопку «Запись» или «Программа».

Шаг 4. Опускаем манипулятор до тех пор, пока захват не «наденется» на заготовку.

Шаг 5. Записываем опорную точку.

Шаг 6. Закрываем левый захват. Заготовку можно поднимать.

Шаг 7. Записываем опорную точку.

Шаг 8. Поднимаем заготовку на высоту перемещения к обрабатывающему центру.

Шаг 9. Записываем опорную точку.

Шаг 10. Перемещаем манипулятор таким образом, чтобы центр правого захвата находился напротив обработанной детали, и раскрываем правый захват.

Шаг 11. Совмещаем ось захвата с осью детали.

Шаг 12. Записываем опорную точку.

Шаг 13. Выдвигаем манипулятор до тех пор, пока захват не «наденется» на готовую деталь.

Шаг 14. Записываем опорную точку.

Шаг 15. Закрываем правый захват. Деталь готова к съему с обрабатывающего центра.

Шаг 16. Записываем опорную точку.

Шаг 17. Поднимаем манипулятор до появления зазора между захваченной деталью и столом обрабатывающего центра.

Шаг 18. Записываем опорную точку.

Шаг 19. Втягиваем манипулятор, выводя захваты из рабочей зоны обрабатывающего центра.

Шаг 20. Записываем опорную точку.

Шаг 21. Перемещаем манипулятор таким образом, чтобы заготовка находилась напротив установочного места на столе обрабатывающего центра.

Шаг 22. Записываем опорную точку.

Шаг 23. Выдвигаем манипулятор так, чтобы заготовка находилась над установочным местом на столе обрабатывающего центра.

Шаг 24. Записываем опорную точку.

Шаг 25. Опускаем манипулятор до соприкосновения заготовки со столом обрабатывающего центра.

Шаг 26. Записываем опорную точку.

Шаг 27. Раскрываем левый захват, освобождая заготовку.

Шаг 28. Записываем опорную точку.

Шаг 29. Втягиваем манипулятор, выводя захваты из рабочей зоны обрабатывающего центра.

Шаг 30. Записываем опорную точку.

Шаг 31. Перемещаем манипулятор таким образом, чтобы готовая деталь находилась над выходным транспортером.

Шаг 32. Записываем опорную точку.

Шаг 33. Опускаем готовую деталь на транспортер.

Шаг 34. Записываем опорную точку.

Шаг 35. Раскрываем правый захват, освобождая готовую деталь.

Шаг 36. Записываем опорную точку.

Шаг 37. Поднимаем манипулятор над готовой деталью и выходным транспортером.

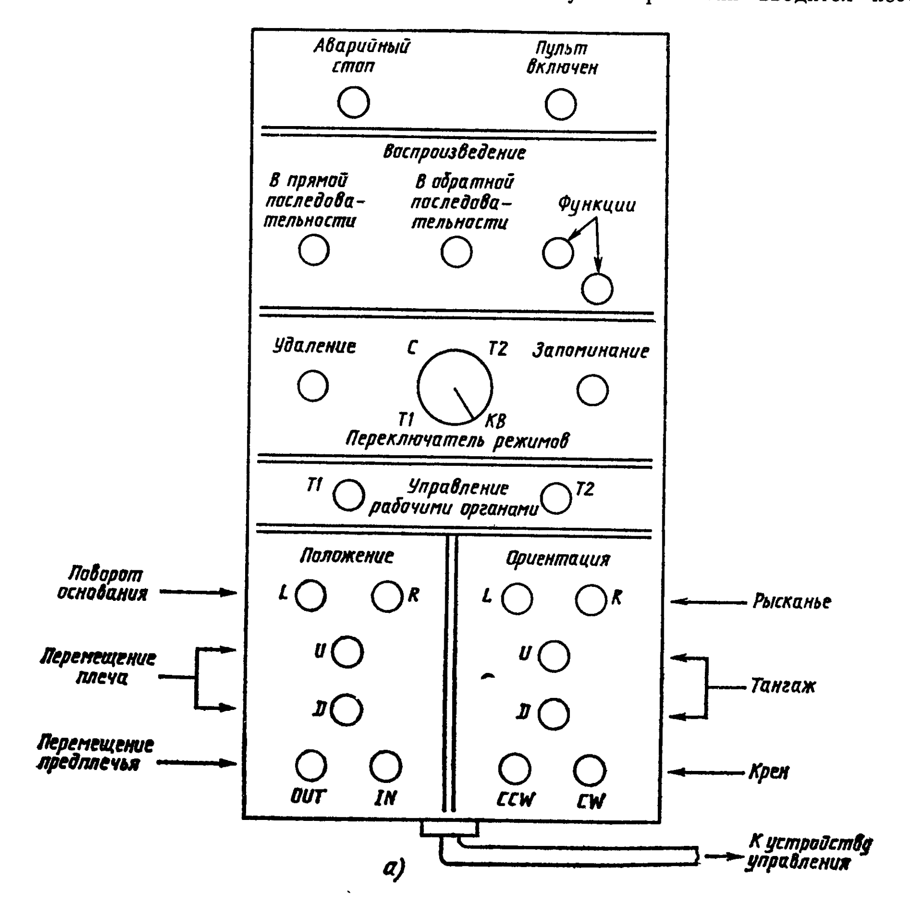
Шаг 38. Записываем опорную точку.

Шаг 39. Возвращаем манипулятор в исходное положение и задаем конец цикла.

После выполнения перечисленных 39 шагов в устройстве управления роботом записаны координаты всех опорных точек программы. После этого оператор вводит информацию о действиях, выполняемых в этих точках. Например, можно заставить робот ждать в точках 3 и 12 сигналы от внешних датчиков, разрешающих продолжение работы. В точке 30 следует послать сигнал в устройство управления обрабатывающего центра. Кроме того, следует предусмотреть специальные приемы работы с первой и последней заготовкой серии. Последовательность их обработки несколько отличается от приведенной.

19.2.2. Ввод информации о действиях в процессе обучения

Информация о действиях, выполняемых в опорных точках, может быть введена в устройство управления робота не после, а в процессе обучения. При этом оператор вначале позиционирует манипулятор, нажимая на соответствующие кнопки пульта-приставки. Затем с клавиатуры видеотерминала или пульта-приставки вводится необходимая информация (например, скорость перемещения). После этого нажимается кнопка «Запись», и информация записывается в память устройства управления робота. Оператор повторяет эти действия, пока не дойдет до конца последовательности. Если в программу следует ввести ветвление, то действия, соответствующие различным ветвям, вводятся по очереди, сначала для одной (все опорные точки), затем — после подачи в устройство управления специальной команды — для другой.



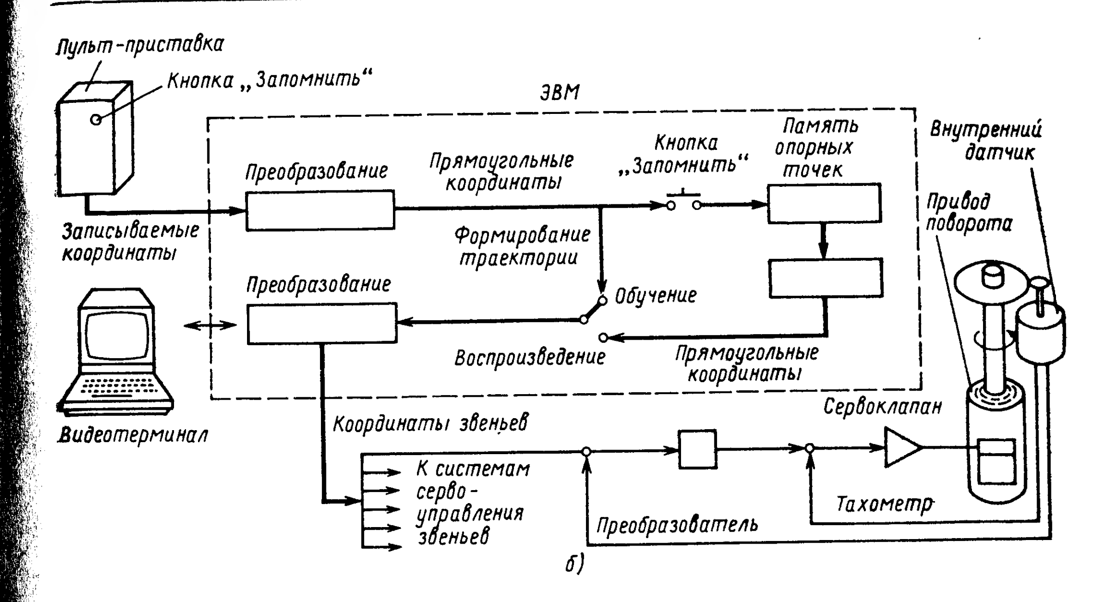


Рис. 19.3. Пульт-приставка, используемый в режиме обучения:
а — внешний вид гипотетического устройства; *б* — структурная схема использования

19.2.3. Устройство управления робота и пульт-приставка

В режиме обучения наряду с пультом-приставкой часто используется видеотерминал устройства управления робота. На рис. 19.3 изображен пульт-приставка, присоединяемый к устройству управления робота, в состав которого входит видеотерминал. Устройство управления имеет ряд кнопок, управляющих перемещениями и действиями робота. Клавиатура видеотерминала используется для ввода информации о выполняемых действиях и редактирования программ. Пульт-приставка соединяется с устройством управления робота длинным кабелем, позволяющим оператору выбирать положение в рабочем пространстве, из которого хорошо видны все части оборудования технологической ячейки, выполняющие какие-либо действия. С пульта-приставки подаются команды, управляющие перемещениями манипулятора робота, и команды записи опорных точек. На пульте-приставке, изображенном на рис. 19.3, имеются кнопки перемещения по шести степеням подвижности (они расположены в нижней части пульта). Шесть левых кнопок управляют движениями манипулятора, шесть правых — запястья. Каждой степенью подвижности управляют две кнопки, включающие движение в противоположных направлениях. С помощью этих кнопок выполняются все операции позиционирования робота в режиме обучения.

Рассмотрим пульт-приставку робота *ASEA SII*, в котором используются новейшие достижения в области разработки таких устройств. В его состав входят мнемоническая рукоятка, две клавиатуры для ввода цифровых данных и информации о выполняемых действиях, а также дисплей, на котором отображаются сообщения оператору. Вводом соответствующих функциональных клавиш функциональная рукоятка переключается на управление манипулятором или запястьем. Перемещение рукоятки вправо приводит к движению робота в том же направлении, перемещение вперед вызывает выдвижение манипулятора. Подъем и опускание манипулятора задаются нажатием кнопки, расположенной на верхней ча-

сти мнемонической рукоятки. Некоторые кнопки клавиатуры пульта имеют постоянное назначение, а назначение остальных определяется программным обеспечением, работающим в составе операционной системы устройства управления. Обозначения действий, задаваемых такими программно определяемыми кнопками, высвечиваются на дисплее непосредственно над ними. Использование подобного меню ускоряет обучение оператора и сокращает количество ошибок. В качестве примера рассмотрим подфункции команды *POS*, выбранной нажатием кнопки с постоянным значением. Общее число подфункций — 11. Название первых четырех из них высвечивается над первыми четырьмя программно определяемыми кнопками. Над пятой программно определяемой кнопкой высвечивается название подфункции *SCAN* — сканирования. Если оператору требуется одна из высвеченных подфункций, он нажимает соответствующую кнопку. Если нужная подфункция не высвечена на дисплее, оператор нажимает кнопку *SCAN* и над первыми четырьмя программно определяемыми кнопками высвечиваются названия следующих четырех подфункций. Сканирование продолжается до тех пор, пока нужная подфункция не будет найдена. Программное обеспечение обеспечивает выбор оператором только одной из подфункций, допустимых в конкретной ситуации, он не может ввести недопустимую или некорректную подфункцию.

Большинство заданий роботов состоит в перемещении детали или инструмента по заданной траектории или в заданную точку. Поэтому оператор основное внимание уделяет не звеньям манипулятора, а положению захвата или инструмента. Во многих устройствах управления перемещения задаются не для степеней подвижности, а для центра инструмента. В контрольных точках хранятся параметры положения центра инструмента относительно системы координат робота (они определяют как координаты центра инструмента, так и его пространственную ориентацию). При переключении в режим воспроизведения по параметрам положения центра инструмента вычисляются смещения отдельных звеньев робота, используемые алгоритмами управления. В этом случае требования к вычислительной мощности устройства управления резко возрастают, поэтому во многих случаях в структурах данных, соответствующих опорным точкам, предпочитают хранить значения смещений звеньев. Это соображение нельзя упускать из виду при выборе типов перемещений, задаваемых оператором в процессе обучения, и набора функций, к которым можно обращаться из программ.

Движение манипулятора состоит из одновременных или последовательных перемещений его звеньев, но оператора, составляющего программу, они мало интересуют — для него важно перемещение захвата или инструмента. Первые образцы пультов-приставок позволяли задавать только поочередное перемещение отдельных звеньев манипулятора. В некоторых устройствах управления, хранящих смещения звеньев, этот режим и сегодня остается единственным. Например, ранние версии пульта-приставки фирмы ACEA позволяли задавать согласованные перемещения манипулятора в горизонтальной и вертикальной плоскостях, но все остальные перемещения могли выполняться только поочередно. Новые методы задания перемещений центра инструмента существенно упрощают составление программ выполнения многих операций.

19.2.4. Обучение в различных системах координат

Для дальнейшего упрощения процесса обучения в современных устройствах управления [например, обучающих пультах-приставках производства фирмы «Цинциннати милакрон» (см. рис. 19.3) и компании ACEA] предусматривается использование нескольких систем координат. В зависимости от конструкции устройства управления робота, оператор может задавать положение рабочего органа в прямоугольных, сферических или цилиндрических координатах. В прямоугольной системе координат перемещения вправо и влево выполняются в плоскости Y, вперед и назад — в плоскости X, вверх и вниз — в плоскости Z. В сферической системе координат положение задается разворотом вокруг оси основания, углом наклона вектора, соединяющего основание с рабочим органом, и модулем этого вектора. В цилиндрической системе координат степени подвижности включают в себя вращение вокруг оси основания, выдвижение и втягивание манипулятора в горизонтальной плоскости, а также его перемещение вверх и вниз. Кроме того, возможно определение степеней подвижности в прямоугольной системе координат, связанной с запястьем. Эта система координат очень удобна при составлении программ. При ее использовании перемещения робота задаются в системе координат, направление осей которой определяется пространственной ориентацией запястья.

Задание положения центра инструмента не определяет ориентацию последнего. Как правило, степени подвижности запястья — крен, тангаж и рысканье — управляются отдельным набором кнопок или мнемонической рукояткой. При задании перемещения манипулятора одним из выше перечисленных способов центр инструмента меняет свое положение в пространстве. При изменении ориентации инструмента его центр остается неподвижным, поскольку степени подвижности запястья определяют различные вращения вокруг него. Траектория движения манипулятора в автоматическом режиме в общем случае не совпадает с траекторией его движения в режиме обучения, поскольку в устройстве управления хранится информация только о конечной точке перемещения.

Покоординатное задание перемещений можно использовать тогда, когда для выполнения задания достаточно зафиксировать конечные точки перемещений. Если для выполнения задания необходимо запомнить и точно воспроизвести сложную траекторию движения рабочего органа, желательно воспользоваться контурным управлением. Это позволит существенно повысить производительность труда программиста, но требует усложнения устройства управления и управляющих алгоритмов (в связи с необходимостью хранить информацию о перемещениях центра инструмента).

19.2.5. Связь перемещений в режимах обучения и воспроизведения

Связь между способами запоминания перемещений в режиме обучения и управляющими алгоритмами режима воспроизведения этих перемещений в реальном масштабе времени не всегда очевидна. Например, программа, составленная в режиме контурного управления, может быть воспроизведена в режиме позиционного управления. Это позволяет снизить требования к системам сервоуправления, а также сократить вычислительную нагрузку на устройство управления роботом. И наоборот, программа, составленная путем покоординатного задания перемещений, может воспроизводиться в режиме позиционного или контурного управления (в зависимости от желаемых результатов). Многие роботы могут воспроизводить лишь поточечные перемещения или перемещения вдоль отрезков заданного направления. Роботы с более совершенным контурным управлением при задании программы, как правило, могут воспроизводить ее лишь в том же режиме с прямолинейным перемещением между опорными точками. Лишь недавно появились совершенные устройства управления, способные воспроизводить в режиме позиционного управления программы, составленные в режиме контурного управления.

19.2.6. Взаимодействие с вспомогательным оборудованием в режиме обучения

Вряд ли существуют промышленные роботы, выполняющие свои задания «в одиночку», без взаимодействия со вспомогательным оборудованием. В примере, приведенном на рис. 19.2, робот должен взаимодействовать как с обоими транспортерами, так и с обрабатывающим центром. Необходимо воспринимать входные сигналы от подающего транспортера, говорящие о готовности заготовки к захватыванию, и от обрабатывающего центра, сообщающие о том, что обработка завершена и готовую деталь можно забирать. Желательно также пользоваться каким-либо внешним датчиком, подающим сигнал тогда, когда выходной транспортер готов принять обработанную деталь. После установки заготовки и отвода манипулятора робот должен подавать в обрабатывающий центр сигнал, запускающий обработку. Кроме того, в систему могут включаться датчики, проверяющие наличие детали в захвате и подтверждающие остановку транспортера.

Информация о необходимости приема или выдачи сигнала заносится в программу робота в виде информационных структур, связанных с опорными точками. Информация, записанная в таких структурах, может задавать выполнение следующих действий.

Ждать появления высокого уровня сигнала на определенном входе.

В случае отсутствия сигнала перейти на подпрограмму.

Подать необходимое питающее напряжение на исполнительный механизм.

Входные и выходные сигналы могут быть цифровыми (например, формируемыми концевыми выключателями, контактными группами реле, фотоэлементами) и аналоговыми (например, температура пламени горелки, напряжение сварочной дуги). В составе устройств управления многих роботов имеются программно управляемые интерфейсные блоки, с помощью которых осуществляется взаимодействие со вспомогательным оборудованием.

Следует также отметить, что в состав устройства управления робота могут входить дополнительные блоки сервоуправления, позволяющие организовать согласованное с действиями и перемещениями робота управление движением внешних устройств. Это очень удобно при совместном использовании робота и сварочных позиционеров, предназначенных для перемещения и фиксации свариваемых деталей в нужных положениях (см. гл. 29). Большинство сего-

дняшних позиционеров управляются кулачковыми задающими устройствами, но использование сервоуправления позволяет резко повысить качество сварки с одновременным сокращением ее технологического цикла. Сигналы, подаваемые в дополнительные блоки сервоуправления, также записываются в информационные структуры, связанные с опорными точками траектории.

19.2.7. Организация ветвления программы

Возможность принятия решений позволяет роботу прерывать выполнение задания и переключаться на другие действия, необходимые для адекватного реагирования на изменение внешних условий. Системы программирования в режиме обучения с использованием пульта-приставки предоставляют несколько возможностей для введения в программу проверок условий и вариантов траекторий. Какие из них конкретно задействованы на той или иной роботизированной системе — зависит от степени сложности устройства управления и фантазии системных программистов, разрабатывавших его базовое программное обеспечение. Для дальнейшего рассмотрения разделим способы ветвления программ на переходы и обработку прерываний, а каждый из этих классов — на группы. Более подробно вопросы, связанные с введением в программу проверки условий и ветвлений, обсуждаются в разд. 19.3.

Класс переходов разделяется на стандартные переходы, условные переходы и переходы со смещением. Первые две подгруппы связаны с переходом на движение по траекториям, заданным в абсолютной системе координат, а третья предполагает переход на движение по траектории, заданной относительно точки, в которой находился манипулятор в момент перехода.

Стандартные переходы. Стандартный переход предполагает введение в программу проверки наличия сигнала в некоторой опорной точке и в зависимости от этого выбор той или иной траектории движения. Следует отметить, что устройство управления не следит за состоянием сигнала постоянно, его значение проверяется только в момент прихода манипулятора в опорную точку, в которой задан стандартный переход. Внешний сигнал импульсного типа может остаться «незамеченным» и не вызвать перехода. Последовательность действий, выполняющаяся после перехода, может завершаться в точке, где она начиналась, или в другой точке. В практических программах иногда используется по несколько стандартных переходов. Следует отметить, что несколько альтернативных ветвей программы могут начинаться в одной и той же опорной точке. При этом устройство управления должно по очереди проверять несколько входных сигналов и выполнять переход на ветвь порграммы, соответствующую сигналу, обнаруженному в первую очередь.

Условные переходы. Условный переход представляет собой модификацию стандартного перехода. Вместо проверки соответствия состояния одного входного сигнала заданному значению такая проверка выполняется для нескольких входных сигналов одновременно. Выделение условных переходов в отдельную группу обусловлено их принципиальным отличием от стандартных. Если ограничиться лишь стандартными переходами, программа становится очень длинной, а количество входных сигналов — слишком большим. На рис. 19.4, *а* представлен стандартный или условный переход на альтернативную основной программе ветвь. По внешнему эффекту (изменению траектории) они совершенно эквивалентны.

Переходы со смещением. Группа переходов со смещением позволяет программисту задавать последовательность движений манипулятора и действий, выполняемых относительно текущего положения манипулятора и(или) рабочего органа в момент выполнения перехода. В процессе выполнения действий, входящих в альтернативную ветвь, все заданные в ней опорные точки преобразуются (смещаются) относительно текущего положения манипулятора и запястья. Переходы со смещением широко используются при составлении программ для устройств управления, хранящих в опорных точках координаты центра инструмента. Как правило, переходом со смещением реализуется последовательность перемещений и действий, многократно выполняемая в различных опорных точках (подпрограмма). Например, с помощью перехода со смещением можно описать вставление винтов в отверстия при сборке.

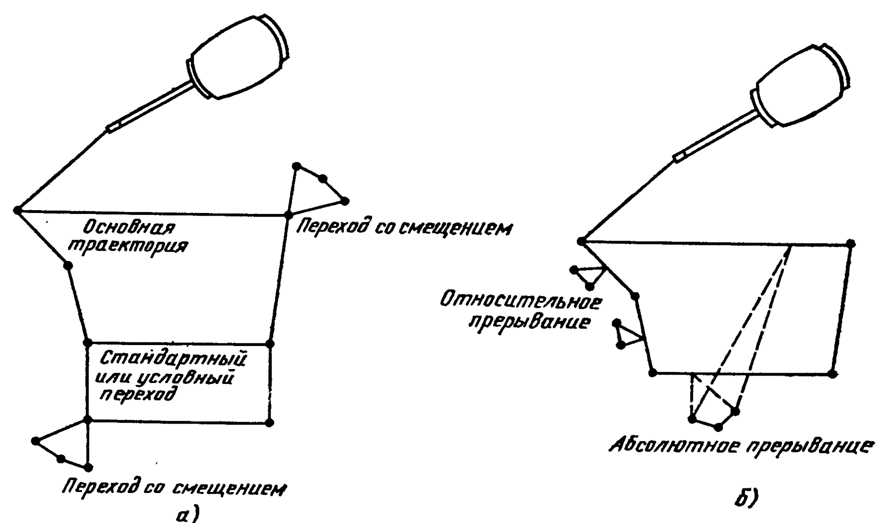


Рис. 19.4. Переходы и прерывания позволяют модифицировать управляющую программу в процессе ее выполнения:
а — использование переходов; *б* — использование прерываний

19.2.8. Задание обработки прерываний в режиме обучения

В отличие от переходов на альтернативные ветви, выполняющихся в заранее определенных опорных точках, прерывание может вызвать переход на обрабатывающую подпрограмму в любом месте цикла. Управляющее устройство робота постоянно следит за состоянием сигналов прерываний. В момент возникновения прерывания робот немедленно прерывает выполнявшееся действие и переходит к выполнению подпрограммы обработки прерывания. Эти подпрограммы разделяются на абсолютные и относительные (рис. 19.4, *б*). Относительная подпрограмма обработки прерывания аналогична переходу со смещением в том смысле, что все опорные точки, входящие в нее, преобразуются относительно положения манипулятора и запястья в момент выдачи прерывания. Такие подпрограммы часто используются в роботах для точечной сварки. Если устройство управления такого робота с помощью датчиков обнаруживает, что сварочная головка приварилась к свариваемым деталям, выполняется покачивание головки вокруг точки сварки. Абсолютные подпрограммы обработки прерываний состоят из опорных точек, положение которых зафиксировано в координатной системе робота. В случае перехода на абсолютную подпрограмму обработки прерывания робот перемещает манипулятор из текущего положения в начальное положение, задаваемое этой программой, и выполняет задаваемые ею перемещения и действия. Если робот обслуживает несколько станков, то действия, выполняемые им при сбое одного из станков, могут описываться с помощью абсолютной подпрограммы обработки прерывания.

19.3. Дополнительные приемы программирования с помощью пульта-приставки

В настоящее время разработано много приемов программирования с помощью пульта-приставки, упрощающих труд оператора и повышающих универсальность составляемых программ. В последующих разделах описываются некоторые из этих приемов, характерных для современного уровня развития программирования.

В документации многих производителей роботов альтернативные ветви программы и подпрограммы обработки прерываний называются просто подпрограммами. Они не во всем аналогичны подпрограммам, используемым в алгоритмических языках высокого уровня, но предназначены для той же цели. В рекламном проспекте одной фирмы недавно появилось сообщение о возможности создания общей библиотеки таких подпрограмм на гибком магнитном диске. Хранящиеся в этой библиотеке подпрограммы можно использовать для задания стандартных последовательностей перемещений и действий. По мере разработки и отладки в библиотеку можно вносить новые стандартные подпрограммы. Одновременно с увеличением объема библиотеки будет расти и ее информационная ценность. Использование подобных библиотек позволит существенно ускорить составление программ и удешевить его, но только при условии правильного ведения «библиотечного хозяйства».

19.3.1. Обучение и использование датчиков

Датчики также могут использоваться для упрощения процесса разработки программ и повышения их гибкости. Они позволяют

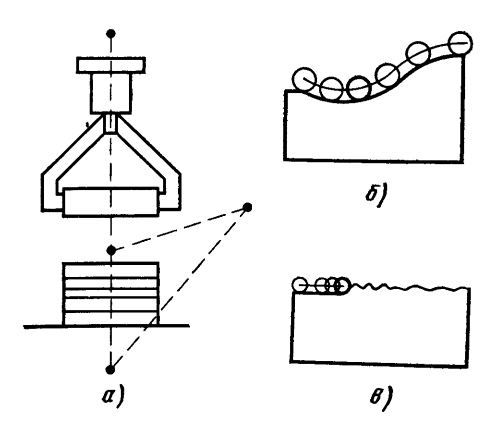


Рис. 19.5. Использование датчиков и адаптивных функций позволяет модифицировать управляющую программу по внешним сигналам:
а — операция поиска; *б* — отслеживание контура; *в* — управление скоростью перемещения

отыскивать объекты, отслеживать их контуры и управлять скоростью перемещений. Для этого применяются самые различные датчики — от простейших конечных выключателей до сложных преобразователей, формирующих аналоговый сигнал. При поиске и отслеживании контура объекта может одновременно использоваться до трех датчиков и это позволяет работать в трехмерном пространстве.

Операция поиска (рис. 19.5, *а*) — обязательная составная часть заданий, включающих в себя штабелирование. В режиме обучения задаются точка подвода, высота пустого штабеля и точка отвода. От точки подвода робот с постоянной скоростью перемещает рабочий орган в направлении точки, соответствующей высоте пустого штабеля. Когда в устройство управления робота поступает сигнал, что рабочий орган соприкоснулся с вершиной штабеля, оно подает команду на перемещение манипулятора в точку отвода. Поскольку мгновенная реакция на сигнал невозможна, рабочий орган должен подводиться к штабелю с малой скоростью, а его конструкция должна обладать определенной податливостью. Точно так же можно отыскивать и захватывать объекты, точное значение параметров положения которых заранее неизвестно.

Отслеживание контура позволяет осуществлять перемещение робота по не полностью определенной траектории. Программа осуществляет перемещение рабочего органа с датчиками в точку начала отслеживания. По мере продвижения рабочего органа по контуру датчик посылает информацию о наличии контакта с поверхностью (рис. 19.5, *б*). Отслеживание может использоваться как в режиме воспроизведения, так и при обучении — в этом случае траектория движения вдоль контура запоминается.

Управление скоростью перемещения (рис. 19.5, *в*) используется в тех случаях, когда по каким-либо причинам результат операции зависит от скорости движения рабочего органа по траектории. Если рабочий орган испытывает малое сопротивление движению, скорость его перемещения остается неизменной. Если сопротивление возрастает, скорость перемещения уменьшается, что приводит к уменьшению сопротивления. Такой прием может использоваться, например, при зачистке деталей. Робот ведет инструмент по заданной траектории с постоянной скоростью. В случае возрастания сопротивления резанию (увеличение толщины слоя снимаемого материала) скорость перемещения снижается до значения, соответствующего номинальному сопротивлению.

19.3.2. Обучение и взаимодействие с управляющей ЭВМ

Как правило, в роботах, программируемых в режиме обучения с помощью пульта-приставки, предусмотрена возможность подключения устройства управления к внешней управляющей ЭВМ. Канал связи может использоваться для передачи в память внешней ЭВМ программ, которые впоследствии могут по мере необходимости загружаться обратно в устройство управления для исполнения. Кроме того, внешняя ЭВМ может использоваться для модификации отдельных ветвей программы. В этом случае в нее передается соответствующая всей ветви часть программы. ЭВМ модифицирует значения, записанные в структурах данных, связанных с опорными точками, и возвращает часть программы в устройство управления. При выполнении модифицированной ветви рабочий орган будет проводиться по точкам, записанным в программу внешней ЭВМ, а не запомненным на этапе обучения. Аналогичным способом робот может взаимодействовать с управляющей системой более высокого уровня или со сложными подсистемами очувствления — зрительными, силомоментными и тактильными.

В последнее время выделились две области использования режима взаимодействия с внешней ЭВМ. Первая предполагает использование внешней ЭВМ для модификации альтернативных ветвей программы по данным, полученным от подсистемы зрительного очувствления. В программу, составляемую в режиме обучения, вводятся ветви, соответствующие последовательности захвата объекта, но геометрические параметры опорных точек этих ветвей не заполняются. В рабочем режиме эти ветви передаются в ЭВМ подсистемы зрительного очувствления. Эта подсистема определяет параметры положения детали, рассчитывает траекторию движения робота и предоставляет соответствующие значения в структуру данных опорных точек. Затем модифицированная ветвь загружается в устройство управления роботом и выполняется. Вторая область включает в себя отслеживание линии шва при дуговой сварке. Траектория движения по шву определяется с помощью подсистемы зрительного очувствления или лазерного сканирующего устройства. После этого ветвь программы модифицируется геометрическими данными и значениями параметров сварки, и загружается в устройство управления робота.

19.3.3. Обучение и сопровождение

Некоторые роботы позволяют сопровождать движущиеся объекты. Поскольку многие промышленные операции выполняются в рамках конвейерных линий, это представляет собой важное свойство. Режим сопровождения предполагает возможность синхронизации движений робота с непрерывным движением конвейера. Существует два способа организации режима сопровождения. Первый из них предполагает установку робота на подвижном основании, перемещающемся параллельно направлению движения конвейера. Скорость перемещения основания синхронизируется с движением конвейера, и робот работает так, как он работал бы с неподвижным объектом. При сопровождении конвейера неподвижным роботом требуется более совершенное устройство управления, способное динамически корректировать команды перемещения робота с учетом данных, полученных от датчиков положения конвейера.

В обоих случаях программа может составляться при неподвижном объекте. Пульт-приставка используется для позиционирования манипулятора и запоминания опорных точек. В рабочем режиме в момент приведения движущегося объекта в исходное положение относительно неподвижного робота в устройство управления роботом поступает сигнал синхронизации. Поскольку взаимное расположение робота и объекта стало таким же, как в процессе обучения, начальные опорные точки траектории совпадут. Все остальные опорные точки модифицируются по результатам опроса датчика положения конвейера, который опрашивается с достаточно большой частотой. Поскольку в режиме воспроизведения приходится рассчитывать смещения всех звеньев манипулятора, сопровождение легко реализуется только для роботов, в устройстве управления которых хранится информация о положениях центра инструмента.

Для роботов, установленных на подвижном основании, программа составляется довольно просто, но при этом увеличиваются затраты на оборудование и могут возникнуть дополнительные трудности, связанные с размещением технологических ячеек вдоль конвейера. Для стационарных роботов основные трудности связаны с составлением программ. Робот может сопровождать объект спереди, сбоку или сзади. Поскольку рабочее пространство робота ограничено, программисту приходится учитывать не только геометрические ограничения, но и их изменение во времени. Различные участки рабочего пространства доступны только в определенные интервалы длительности цикла. Из этого следует, например, что операции, выполненные над движущимся объектом спереди, надо выполнить в первую очередь, пока его передняя грань не вышла за пределы доступного рабочего пространства.

19.3.4. Аварийный вывод манипулятора и вспомогательные ветви

При составлении программы следует предусмотреть ветви, соответствующие аварийному выводу манипулятора из рабочей зоны и вспомогательным действиям. Аварийный вывод выполняется в случае невозможности перевода манипулятора в точки, заданные в режиме обучения. Вспомогательные ветви аналогичны подпрограммам обработки прерывания (см. выше), но выполняются в момент движения инструмента.

19.3.5. Запоминание управляющих параметров дуговой сварки

Многие приемы программирования разрабатывались специально для упрощения составления программ сварочных роботов. Высокая точность повторного позиционирования, высокая нагрузочная способность и скорость движения манипуляторов этих роботов позволяют получать высококачественные сварные швы, но для этого необходимо управлять параметрами сварки.

Одним из приемов программирования сварочных роботов является составление «расписания» сварки. Это «расписание»

представляет собой таблицу, в которую сведены скорость подачи электрода, скорость движения вдоль шва и напряжение дуги. По мере задания траектории сварного шва в информационные структуры, соответствующие опорным точкам, записываются номера строк этой таблицы, содержащих необходимое сочетание параметров сварки. В ходе воспроизведения траектории устройство управления роботом будет устанавливать соответствующие значения параметров и выдавать соответствующие управляющие сигналы устройству управления сваркой. Поскольку параметры сварки являются составной частью программы робота-сварщика, гарантируются повторяемость режимов при последовательной работе и единообразие изделий.

При дуговой сварке важную роль играет скорость перемещения рабочего органа по линии шва. На различных участках шва скорость может быть разной в зависимости от необходимой глубины сваривания. Если скорость перемещения необходимо изменить, оператор может сделать это, корректируя значения, записанные в опорных точках, с пульта-приставки. Для упрощения программирования сварочных заданий могут использоваться переходы со смещением. Для многопроходной сварки можно задавать траекторию только одного прохода и оформлять ее в виде многократно выполняемой подпрограммы. При этом многопроходный шов задается программой с несколькими геометрически совпадающими опорными точками, в которых выполняется переход со смещением к одной и той же подпрограмме.

Специально для упрощения программирования сварочных операций в устройства управления роботов для дуговой сварки иногда вводят стандартную функцию колебания электрода. Эта функция может вызываться в любой опорной точке и действовать до произвольно заданной последующей опорной точки. Оператор в режиме обучения задает начальную и конечную точки, а затем с клавиатуры вводит следующие пять значений: 1) количество периодов колебаний, 2) амплитуду правой полуволны, 3) амплитуду левой полуволны, 4) долю периода, приходящуюся на пребывание электрода в крайнем правом положении (в процентах), 5) долю периода, приходящуюся на пребывание электрода в крайнем левом положении.

19.4. Программирование проводкой

В большинстве случаев, программирование проводкой используется для роботов с контурным управлением. Для задания траектории движения оператор с помощью рукоятки, присоединенной непосредственно к манипулятору, заставляет последний перемещаться. При этом запоминаются как траектория, так и относительные скорости перемещения манипулятора по ее отдельным участкам. В процессе проводки внутренние датчики положения робота измеряют параметры положения всех звеньев манипулятора, и передают их в устройство управления. Впоследствии эти данные, преобразованные в цифровую форму и записанные в память, используются в режиме воспроизведения. Автоматическое воспроизведение позволяет точно воспроизводить заданную траекторию и тем самым копировать приемы работы оператора. Сочетание программирования проводкой и робота с контурным управлением дает наилучшие результаты для заданий, включающих в себя окраску распылением, нанесение герметиков и дуговую сварку.

Устройства управления сварочных роботов фирмы «ДеВилбисс/Траллфа» предоставляют пользователю возможность выбора режима обучения: проводкой с включенной сварочной дугой или по опорным точкам с выключенной дугой. В устройстве управления робота «Серия 7» производства фирмы «Термвуд», предназначенного для манипулирования различными объектами, предусмотрено совмещение обоих режимов: траектории перемещения задаются проводкой, а последовательности захватывания и отпускания объектов — по опорным точкам.

Основное преимущество режима обучения проводкой перед использованием пульта-приставки — простота составления программ. Приемы программирования проводкой весьма просты, им можно обучить наиболее квалифицированных рабочих из числа тех, кто выполняет роботизируемую операцию вручную (например, маляра или сварщика). Для упрощения проводки манипулятора по требуемой траектории он кинематически балансируется. Подобная балансировка позволяет манипулировать рабочим органом робота, прикладывая не больше усилий, чем при работе традиционным ручным инструментом. Иногда на манипуляторе робота устанавливается не одна, а две рукоятки: одна используется для управления рабочим органом, а вторая — промежуточными звеньями манипулятора.

19.4.1. Обучение проводкой с использованием задающего устройства

К сожалению, не всегда кинематическая балансировка манипулятора приводит к желаемому эффекту. В некоторых случаях манипулирование рабочим органом требует приложения больших усилий. Во многих моделях роботов предусмотрено использование в процессе составления программы не основного, а вспомогательного манипулятора облегченной конструкции (задающего устройства), кинематически эквивалентного основному. При составлении программы оператор манипулирует задающим устройством, формирующим информацию о положении всех звеньев манипулятора. Эта информация записывается устройством управления, а затем используется в режиме воспроизведения. Для аналого-цифрового преобразования позиционной информации и ее запоминания в состав робототехнического комплекса вводится дополнительное устройство управления или задающее устройство соединяется кабелем с основным устройством управления.

При программировании проводкой возможно тиражирование программ, составленных на специально выделенной программирующей системе, на другие роботы того же типа. Программирующая система может представлять собой либо типовой робот, либо задающее устройство в комплексе с устройством управления. Программа составляется в режиме обучения проводкой на программирующей системе, а затем передается для воспроизведения в устройства управления рабочих роботов. Передача программы может выполняться одним из следующих способов: на кассете с магнитной лентой, на гибком магнитном диске, по прямому каналу связи. Как правило, небольшие отличия отдельных экземпляров однотипного робота можно не принимать в расчет в силу специфики заданий, наиболее удобных для программирования в режиме обучения проводкой.

19.4.2. Системное программное обеспечение режима обучения проводкой

Как правило, системное программное обеспечение режима обучения проводкой включает в себя средства редактирования составленных программ. В некоторых случаях, когда программа невелика, ее редактирование сводится к стиранию и составлению новой программы. Когда программа достаточно большая, она разбивается на отдельные сегменты, причем задание траекторий, соответствующих этим сегментам, можно выполнять по отдельности. Полная программа собирается путем «склеивания» отдельных сегментов. Поскольку в устройстве управления робота сегменты хранятся отдельно друг от друга, пользователь может удалить любой из них или заменить его. Для этого автономно составленный сегмент включается в ранее составленную программу на место удаленного. Если программа составлена в режиме контурного управления, сегмент представляет собой наименьший элемент замены в программе.

Существует несколько способов записи информации о положениях звеньев манипулятора в процессе проводки по траектории. Простейший из них предполагает фиксированную частоту опроса внутренних датчиков положения с последующим аналого-цифровым преобразованием и немедленной записью в память устройства управления. В режиме воспроизведения устройство управления проводит робот через запомненные таким образом опорные точки. Другой способ предполагает опрос датчиков с частотой, превышающей желаемую частоту расположения опорных точек в несколько раз. При этом выполняется сглаживание позиционных данных методом плавающего среднего. В качестве опорных точек записываются сглаженные данные. Такой способ позволяет удалять из программы случайные отклонения от траектории, вызванные, например, непроизвольным дрожанием руки программиста. В одном из устройств управления по заданным в процессе обучения опорным точкам выполняется математическая аппроксимация заданной траектории, после чего опорные точки перераспределяются наиболее оптимальным образом (например, обеспечивающим наиболее стабильную скорость перемещения звеньев манипулятора). Независимо от способа записи опорных точек, управление скоростью перемещения рабочего органа обычно ограничено возможностью ее пропорционального изменения в режиме воспроизведения. Для более точной настройки программы каждый из сегментов может выполняться со своей скоростью. Однако в любом случае в программе сохраняются участки с ускорениями и замедлениями, заданными программистом в процессе проводки.

19.4.3. Типовые роботы, программируемые в режиме обучения проводкой

В качестве типового робота, программируемого в режиме обучения проводкой, рассмотрим робот *OM5000* производства фирмы «Грасо». Он предназначен для автоматизации отделочных операций (как с использованием электростатического поля, так и без него). Устройство управления этого робота может работать в режимах позиционного и контурного управления. Стандартный объем памяти позволяет хранить программу, соответствующую непрерывному

движению по траектории на протяжении 28 мин. Программа может сегментироваться и храниться на гибком магнитном диске, в оперативной памяти на базе СБИС или магнитного пузырькового эффекта. На съемной рукоятке установлены кнопки, задающие начало и конец запоминания траектории, регуляторы подачи красящего состава и выключатели, управляющие работой вспомогательного оборудования. Возможно составление программ с последующим тиражированием (использование в качестве программирующей системы).

Роботизированная камера окраски распылением производства фирмы «Дженерал моторс роботикс» представляет собой систему нескольких роботов, программируемых в режиме обучения проводкой и вспомогательного оборудования. В состав системы может входить восемь и более роботов, причем один из них предназначен для программирования. Траектория движения программирующего робота задается оператором в процессе проводки. Полученная траектория движения сглаживается. Цель сглаживания — стабилизация скорости перемещения точки пересечения оси конуса распыления с поверхностью окрашиваемой детали. Программы, составленные на программирующем роботе, могут быть проверены на нем же (он, как и все остальные роботы, установлен в камере распыления). После того как программа отлажена, управляющая работой системы мини-ЭВМ загружает ее в устройство управления робота, назначенного для выполнения задания. Составление программ не влияет на работу системы и может проводиться параллельно с ней. Возможно оперативная корректировка программ. Система обеспечивает точное отслеживание траекторий при заданной скорости перемещения независимо от того, на котором из роботов выполняется программа.

19.5. Тенденции развития программирования в режиме обучения

В последнее время фирмы, производящие роботы, особое внимание уделяют организации интерфейса человек — роботизированная система. Одним из проявлений этой тенденции можно считать создание переносных обучающих пультов-приставок с мнемоническими рукоятками и программно-определяемыми функциональными кнопками. Совершенствование систем балансировки роботов, программируемых в режиме обучения проводкой, объясняется той же тенденцией. Широкое распространение получила концепция задания траектории движения центра инструмента и использования нескольких систем координат, упрощающая составление программ и позволяющая повысить эффективность использования оборудования технологических ячеек.

Расширяется номенклатура стандартных функций, обеспечиваемых программным обеспечением, входящим в комплект поставки робота. По мере того как в повседневный обиход будут входить все новые концепции и алгоритмы, возможности стандартного программного обеспечения типового робота будут расти. С другой стороны, очевидна убежденность многих поставщиков в преимуществах программирования в режиме обучения перед аналитическим программированием. Эти фирмы и в дальнейшем будут совершенствовать эту методику, предоставляя пользователю новые средства и возможности. В качестве примера возрастающих возможностей следует отметить появление программных переменных и интеграцию управления параметрами вспомогательных устройств технологической ячейки в программу робота.

Гибкость и универсальность программирования в режиме обучения не всегда очевидны тому, кто наблюдает за составлением программы со стороны: на первый взгляд этот метод кажется грубым и несовершенным. Но что очевидно сразу — это его простота. Сочетание гибкости с простотой обеспечило широчайшее распространение программирования в режиме обучения. Его приемы легко изучить и использовать, их вполне достаточно, чтобы «справиться» со многими важными классами заданий. Хотя перспективы, открывающиеся перед аналитическим программированием, представляются блестящими, это ни в коей мере не дает оснований говорить об упадке программирования в режиме обучения. В настоящее время именно эта методика составления программ промышленных роботов пользуется наибольшей популярностью и, скорее всего, в ближайшем будущем сохранит свои позиции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Akeel, Hadi A., Expanding the Capabilities of Spray Painting Robots, *Robots Today*, Vol. 4, No. 2, Apri 1982, pp. 50—53.
Colleen, Hans, Giving Robots the Power to Cope, *Robots Today*, Spring 1980, pp. 32—34.

Dawson, Bryan L., Moving Line Applications with a Computer Controlled Robot, Society of Manufacturing Engineers, Paper No. MS77—742, November 1977.
Dorf, Richard C., *Robotics and Automated Manufacturing*, Reston Publishing Co., Reston, Virginia, 1984.
Engelberger, Joseph F., *Robotics in Practice*, American Management Association, 1980.
Green, Robert H., Welding Auto Bodies with Traversing Line-Tracking Robots, *Robotics Today*, Spring 1980, pp. 23—29.
Hohn, Richard E., Application Flexibility of a Computer-Controlled Industrial Robot, Society of Manufacturing Engineers, September 1976, MR76—603.
Holt, H. Randolph, Robot Decision Making, Society of Manufacturing Engineers, November 1977, MS77—751.
Holmes, John G. and Resnick, Bryan J., A. Flexible Robot Arc Welding System, *Proceedings of Robots IV*, November 1979.
Warnecke, H. J. and Schraft, R. D., *Industrial Robots: Application Experience*, IFS Publications Ltd., Kempston, Bedford, Great Britain, 1982.

Глава 20
АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ РОБОТОВ

И. Ф. Йонг, Дж. А. Глив, Дж. Л. Грин, М. К. Бони,
Ноттингемский университет, Великобритания

20.1. Введение

20.1.1. Что такое аналитическое программирование?

Существующие методы программирования промышленных роботов в режиме обучения дают вполне удовлетворительные результаты тогда, когда время, затрачиваемое на разработку программы, намного меньше времени, в течение которого эта программа используется в рабочем режиме. Кроме того, составляемая с их помощью программа не должна быть слишком сложной. При программировании в таком режиме робот последовательно приводится в положения, которые он должен занимать, выполняя задание. Как правило, это делается с помощью установленных на манипулятор рукояток или по командам, подаваемым с пульта-приставки. Как следствие, для того чтобы разработать программу, необходим робот, который будет ее выполнять.

Аналитическое программирование представляет собой методику частичной или полной разработки программ без использования робота. Она включает в себя генерацию координат опорных точек, информации о выполняемых действиях и управляющих структур. Современный уровень развития аппаратного и программного обеспечения робототехнических систем создает благоприятные условия для развития аналитического программирования. Этому способствуют появление совершенных устройств управления, повышение точности манипуляторов, развитие подсистем очувствления. В настоящее время в области методов аналитического программирования ведутся интенсивные научные исследования и ожидается, что в ближайшие годы они прочно войдут в арсенал приемов промышленной робототехники.

20.1.2. Что дает использование аналитического программирования?

Программирование в режиме обучения требует больших затрат времени. Эти затраты растут быстрее чем прямо пропорционально сложности соответствующих заданий. Поскольку в режиме программирования робот не выполняет производственную программу, эффективность его использования может существенно уменьшиться, ставя под вопрос целесообразность его эксплуатации.

Большинство первых промышленных роботизированных систем были заняты в процессе массового производства (например, системы сварки автомобильных кузовов), а их перепрограммирование либо не требовалось, либо занимало минимум времени. Но при работе робота в условиях средне- и мелкосерийного производства время, затрачиваемое на его перепрограммирование, возрастает, что заставляет обратить внимание на методы аналитического программирования. Постоянный рост сложности роботизируемых операций (особенно в области

сборки) делает эти методы еще более привлекательными. К их преимуществам следует отнести следующее.

Сокращение простоев робота. В процессе разработки новой программы робот может выполнять полезную работу. Это позволяет более эффективно использовать технологическую гибкость робота.

Программист выводится за пределы потенциально опасной зоны. Поскольку программа разрабатывается без использования робота, время, в течение которого программист подвергается риску травмы из-за нештатного поведения робота, резко сокращается.

Используется единая программирующая система. Система аналитического программирования позволяет разрабатывать программы для различных роботов, не требуя от программиста знания всех особенностей устройств управления каждого из них. Адаптация разработанной программы для конкретного робота выполняется специальным постпроцессором. Это позволяет избежать переучивания программистов при переходе к работе с роботом нового для них типа.

Система программирования робота интегрируется с базами данных САПР/АСТПП. Это позволяет использовать информацию о стандартных деталях, что резко сокращает объем данных, которые приходится вводить в систему при разработке программ. Интеграция системы программирования робота с САПР/АСТПП позволяет повысить гибкость планирования и управления производством.

За счет применения языков программирования роботов высокого уровня упрощается разработка программ, описывающих выполнеине сложных заданий.

Возможна автоматизация проверки правильности программ. Для этого средствами САПР/АСТПП или самой системы аналитического программирования строится модель робота и окружающего его пространства. Затем с помощью соответствующих программ моделирования разрабатывается последовательность перемещений и действий робота, исключающая столкновения, и по ней генерируется программа робота.

20.2. Развитие методов аналитического программирования

20.2.1. Некоторые аналогии с системами ЧПУ

Многие из приемов аналитического программирования давно используются в системах подготовки программ для станков с ЧПУ, и опыт эксплуатации этих систем может быть распространен на системы аналитического программирования. Хотя программирование промышленных роботов коренным образом отличается от подготовки программ для станков с ЧПУ, при построении систем программирования для тех и других возникают сходные задачи. Поэтому, обсуждая развитие методов аналитического программирования промышленных роботов, полезно вспомнить о трудностях, которые пришлось преодолевать при внедрении систем автоматизированной разработки программ для станков с числовым управлением.

Программы для первых станков с числовым управлением составлялись из кодов команд с координатами соответствующих точек. При этом такие действия, как перемещения инструмента, изменение скорости подачи или вращения шпинделя, обозначались кодами, определяемыми для каждого конкретного типа устройства управления.

Большинство современных промышленных роботов укомплектовано аналогичными устройствами управления, программы для которых составляются из функций, определенных в устройстве управления данного типа. Программирование выполняется только в режиме обучения, причем опорные точки задаются вручную, а их координаты записываются в память устройства управления. По завершении обучения запомненные последовательности перемещений и действий могут быть воспроизведены.

Следующий этап развития методов разработки программ для станков с ЧПУ связан с появлением языков высокого уровня, предоставивших программисту новые возможности. Программирование стало действительно аналитическим, программы стали разрабатываться не в цехе, а на вычислительном центре. Были созданы такие языки высокого уровня, как АТП и ЭКЗАПТ. В этих языках геометрия деталей и инструмента описывается с помощью параметров точек, линий и поверхностей, представленных в текстовом виде. По этим описаниям автоматически генерируется описание траектории движения режущего инструмента. Были разработаны специальные программные интерфейсы, связавшие системы программирования на этих языках с различными устройствами ЧПУ.

В настоящее время системы автономного программирования промышленных роботов находятся на аналогичной стадии развития. Системы с лингвистическим обеспечением программирования типа РАПТ и РОБЭКС предоставляют пользователю такие же средства языка программирования высокого уровня, что и система АПТ. Системы графической ориентации (типа ГРАСП) пользуются программным обеспечением подсистем интерактивной графики, входящих в САПР. Во всех перечисленных системах предусмотрена возможность кинематического моделирования манипулятора с шестью степенями подвижности.

Дальнейшее развитие методов разработки программ для станков с ЧПУ шло по линии интеграции систем программирования и САПР. Скорее всего, аналитическое программирование роботов будет развиваться в том же направлении. Системы с режимом прямого управления роботом будут обязательно ориентированы на обслуживание робототехнических комплексов как с одним, так и с несколькими роботами.

20.2.2. Уровни программирования

О функциональных возможностях системы аналитического программирования роботов можно судить по тому, к каким уровням управления она обеспечивает доступ. Как правило, выделяются четыре уровня управления [1].

Управление на уровне звена манипулятора. Для задания положения манипулятора необходимо программно задать параметры положения всех его звеньев.

Управление на уровне манипулятора. Движения робота описываются положениями манипулятора в системе координат, связанной с основанием робота. Параметры положений звеньев манипулятора рассчитываются автоматически.

Управление на уровне объектов. Задание описывается в терминах перемещений и позиционирования объектов, находящихся в рабочем пространстве робота. Предполагается наличие модели технологической среды, предоставляющей информацию, необходимую для определения нужных положений манипулятора.

Управление на уровне целей. Задание описывается в самой обобщенной форме (например, «окрасить автомобильную дверь изнутри»). Предполагается наличие не только модели технологической среды, но и сведений о технологических приемах. В приведенном примере потребуется, в частности, информация об оптимальных режимах и приемах окраски. Для интерпретации описаний заданий требуются «интеллектуальные» алгоритмы, использующие хранящуюся в базах данных информацию для построения оптимальной, исключающей столкновения программы.

Программирование на уровне объектов и в особенности целей предполагает описание лингвистическими средствами взаимодействия с подсистемами очувствления. Это необходимо для построения управляющих структур программы. Например, условный оператор может использоваться следующим образом:

IF (*SENSOR*-значение) *THEN* действие 1
ELSE действие 2

Большинство современных систем программирования (как в режиме обучения, так и аналитического) ориентируются на уровень управления манипулятором. Разрабатывающиеся в настоящее время лингвистические системы аналитического программирования предусматривают управление на уровне объектов, а организация управления на уровне целей пока еще остается слишком сложной задачей.

20.3. Общие требования к системам аналитического программирования

Методика аналитического программирования тесно связана с технологией САПР/АСТПП. От того, насколько успешно будет протекать процесс их интеграции, зависят промышленное использование роботов с большим числом степеней подвижности и развитие гибких производственных систем (ГПС).

Как уже отмечалось в предыдущем разделе, аналитическое программирование может затрагивать различные уровни управления. В различных системах используются различные методы программирования. Более подробно этот вопрос рассмотрен в разд. 20.5.

Несмотря на возможные различия, всем системам аналитического программирования присущи общие свойства. Ниже перечислены условия, без выполнения которых невозможна эффективная эксплуатация любой системы аналитического программирования.

Знания роботизируемого процесса или задания.

Доступность трехмерной модели окружающей среды, т. е. данных о геометрических свойствах и отношениях объектов, находящихся в рабочем пространстве.

Знание геометрии робота, его кинематики (включая ограничения на перемещение звеньев и скорости этих перемещений) и динамики.

Наличие программной системы, позволяющая генерировать программы для роботов по перечисленной выше информации. Такая система может ориентироваться на использование лингвистического или графического представления информации.

Наличие средств проверки программ, построенных системой. Например, могут проверяться соблюдение рабочих диапазонов перемещения звеньев и отсутствие столкно-

вений манипулятора с объектами в рабочем пространстве.

Наличие средств передачи управляющих программ от системы аналитического программирования к устройствам управления роботов. Применение устройств управления, способных принимать информацию из канала связи, упрощает организацию передачи программ.

Дружественность к пользователю. Человек, работающий с системой аналитического программирования, не взаимодействует с роботом. Для того, чтобы он мог наиболее полно и эффективно формализовать свои профессиональные знания, необходимо, чтобы система аналитического программирования располагала дружественным к пользователю интерфейсом.

20.4. Задачи аналитического программирования

20.4.1. Обзор

Теоретическая модель — программа робота — реальная среда. При работе системы аналитического программирования используется теоретическая модель робота и окружающей его технологической среды. Она предназначена для моделирования поведения робота в реальных условиях. На основе этой модели разрабатываются программы, генерирующие управляющую программу робота.

При разработке системы аналитического программирования необходимо решить три основные задачи. Во-первых, система должна быть инвариантна как к конкретным моделям роботов, так и к областям их использования. Во-вторых, стандартные интерфейсы системы должны обеспечивать совместимость с различными устройствами управления. В-третьих, система аналитического программирования должна учитывать погрешности и неточности реализации технологической среды. В следующих разделах эти задачи обсуждаются более подробно.

20.4.2. Моделирование и программирование

В состав системы аналитического программирования входят три основных компонента: подсистема геометрического моделирования, подсистема программирования и методика программирования. Разработка каждого из них связана с решением некоторых специфических задач, сложность которых быстро возрастает по мере универсализации системы (расширения номенклатуры обслуживаемых роботов). Конечно, система должна быть универсальной (поскольку недостаточно универсальная система малоэффективна), но при этом она не должна становиться чересчур сложной, так как в противном случае пользование ею затрудняется.

Подсистема геометрического моделирования. «Узким местом» любой подсистемы геометрического моделирования оказывается ввод геометрической информации, по которой строятся модели. При работе в интерактивном режиме ввод занимает много времени. Кроме того, велика вероятность ошибок. При разработке системы аналитического программирования вводу исходных данных следует уделить особое внимание. Можно использовать в качестве исходных данных информацию, хранящуюся в существующих САПР, но это требует разработки специальных программ связи и преобразования данных.

Структура используемых данных должна не только адекватно представлять отношения объектов технологической среды, но и предоставлять удобные средства для динамической корректировки этих отношений, меняющихся в процессе моделирования. Кроме того, эти структуры должны отвечать требованиям алгоритмов, используемых в подсистеме геометрического моделирования. Решение перечисленных задач в комплексе может потребовать значительных усилий.

Подсистема моделирования робота. Система аналитического программирования должна моделировать многие свойства многозвенных механизмов. Такое моделирование может осуществляться на различных уровнях.

Самому низкому уровню соответствует система, ориентированная на конкретную модель робота. Хотя такой подход существенно упрощает систему, но одновременно он резко ограничивает область её возможного применения.

Система второго уровня может моделировать роботы, принадлежащие к некоторому классу. Класс роботов выделяется по структуре их манипуляторов. Например, большинство выпускаемых серийно промышленных роботов обладают манипуляторами в виде иерархически организованной совокупности автономно управляемых звеньев. Как правило, каждое из звеньев может перемещаться лишь по одной степени подвижности (вращения или поступательного движения). Для моделирования манипуляторов этого класса существуют стандартные приемы [21]. Если цель управления задана в виде траектории движения центра инструмента, то построить управляющую программу робота довольно сложно даже при таком уровне. Общего решения задачи не существует. Для каждого класса структур манипуляторов приходится разрабатывать свои алгоритмы управления.

Системы третьего уровня способны моделировать манипуляторы сложной структуры. В некоторых роботах используются манипуляторы с механически связанными группами звеньев, каждое из которых нельзя считать независимым от других. Общая теория таких механизмов пока не разработана, хотя по отдельности каждый из них поддается математическому анализу.

Следует ожидать, что в ближайшем будущем подсистемы кинематического моделирования реальных систем аналитического программирования смогут моделировать механизмы, входящие в ограниченные классы, достигнув тем самым статуса моделирующей системы второго уровня. Динамическое моделирование (позволяющее предсказывать такие эффекты, как перерегулирование и колебания манипулятора) в системах аналитического программирования, как правило, не используется из-за большой сложности соответствующих программ.

Методика программирования. Подсистемы геометрического моделирования и моделирования робота позволяют организовать управление структурными единицами робота в окружающей его технологической среде. Методика программирования определяет способ задания последовательностей движений и действий робота, и их логическую организацию. Она должна предусматривать введение в состав последовательности движений команд и функций робота, а также проверок условий, дополняющих их до функционально полной управляющей программы.

Последнее требование существенно усложняет применение системы аналитического программирования в различных прикладных областях. Например, технологические приемы и соответственно функции робота для дуговой сварки существенно отличаются от функций, предусмотренных устройством управления робота для окраски распылением. Адаптация методики программирования к отдельным предметным областям и создание набора соответствующих программных модулей позволяет преодолеть это затруднение.

Программирование робота может осуществляться на различных уровнях (см. разд. 20.2.2). Большинство из разрабатывающихся в настоящее время систем аналитического программирования обеспечивает управление на уровне объекта. Для построения наиболее оптимальных траекторий перемещения манипулятора в окружающей среде и предотвращения столкновений используется интерактивное взаимодействие системы с программистом. Использование графического диалога позволяет упростить это взаимодействие. Программное обеспечение графического режима позволяет программисту строить изображения любой интересующей его части технологической среды в любой момент времени и визуально наблюдать за результатами введения изменений в разрабатываемую программу.

Обобщение методики программирования на случай управления системой с несколькими роботами сопряжено с большими сложностями. Необходимо введение режима программирования действий, выполняемых в реальном масштабе времени и средств связи отдельных программ. По мере развития гибких производственных систем необходимость этих усовершенствований становится очевидной.

20.4.3. Передача управляющих программ роботу

Система аналитического программирования генерирует управляющую программу робота и хранит ее во внутреннем формате. Как правило, представленная в этом формате программа существенно отличается от управляющей программы, которая должна быть загружена в устройство управления робота. Следовательно, возникает необходимость преобразования программы из внутреннего формата системы в формат устройства управления робота.

Сложность состоит в том, что в настоящее время в эксплуатации имеется слишком много типов устройств управления, каждое — со своей системой программирования и форматом представления программ. Поскольку предусмотреть преобразование сгенерированных системой аналитического программирования программ во все эти форматы не представляется возможным, единственной альтернативой остается стандартизация, объекты которой перечислены ниже.

Система аналитического программирования. Принятие некоторой системы в качестве стандарта существенно сократит затраты на разработку программ преобразования форматов. В настоящее время возможность создания стандартной системы аналитического программирования рассматривается в двух рабочих группах. В состав первой входят ученые Великобритании, Франции и ФРГ, другая работает в рамках японского проекта *CAM-I*. Отрадно отметить, что в предварительном отчете европейской группы говорится о сближении взглядов по рассматриваемым вопросам.

Устройство управления. Стандартизация устройства управления робота дает те же преимущества, что и стандартизация системы аналитического программирования, но по практическим и коммерческим соображениям такой вариант стандартизации представляется нереальным.

Формат представления программы. Определение стандартного формата представления управляющей программы робота позволит избежать многих затруднений. Ясно, что такой формат не должен ориентироваться на какие-либо системы программирования или устройства управления. Имеется прецедент стандартизации формата — для станков с ЧПУ таким стандартом стал формат *CLDATA* [4]. В состав программного обеспечения системы программирования вводятся модули, преобразующие внутреннее представление программы в стандартный формат. Преобразование программы, представленной в стандартном формате, в формат конкретного устройства управления осуществляется постпроцессором. Сегодня наиболее вероятным претендентом на стандартизацию является формат *IRDATA* [5], разработанный на базе *CLDATA*. Такую «родословную» можно отнести к его преимуществам — стандарт *CLDATA* хорошо знаком работающим в промышленности технологам. К сожалению, роботы сильно отличаются от станков с ЧПУ, поэтому доработкой формата *CLDATA* невозможно решить все поставленные задачи. Тем не менее именно в этом направлении усилия по стандартизации продвинулись дальше всего.

20.4.4. Погрешности и неточности реализации технологической среды

Реальная технологическая среда всегда отличается от своей идеализированной модели, используемой в системе аналитического программирования. Поэтому сгенерированная последней управляющая программа робота не может обеспечить попадание рабочего органа робота в целевые точки без погрешностей. Определенные погрешности вносятся и самим роботом. Отдельные объекты, составляющие технологическую среду, могут смещаться из своих номинальных положений. Погрешности могут вноситься следующими источниками:

роботом за счет:

а) слишком больших допусков при изготовлении звеньев манипулятора, приводящих к появлению люфта. Малые погрешности, вносимые каждым из звеньев манипулятора, могут сложиться в большую погрешность положения рабочего органа;

б) недостаточной механической жесткости манипулятора. При большой нагрузке это может привести к появлению существенных погрешностей;

в) индивидуальных особенностей. Даже однотипные роботы из одной серии, выполняя одну и ту же программу, не смогут в конце ее прийти в точности в одну и ту же точку. Это явление объясняется индивидуальным характером калибровки каждого робота и уникальностью сочетания погрешностей изготовления звеньев;

устройством управления робота за счет:

а) ограниченной разрешающей способности. Разрешающая способность определяет величины наименьшего возможного перемещения, представимого в устройстве управления;

б) ограниченной вычислительной точности. На ее значение влияют как длина слова микропроцессора (чем она больше, тем выше точность), так и особенности управляющих алгоритмов;

вспомогательным оборудованием технологической ячейки за счет:

а) невозможности точного определения параметров положения элементов технологической среды (робота, вспомогательного технологического оборудования, станков, деталей) в мировой системе координат;

б) влияния изменения внешних условий на рабочие характеристики робота (например, снижение позиционной точности вследствие теплового расширения);

системами аналитического программирования и моделирования, за счет:

а) ограничений вычислительной точности ЭВМ, на которой работает система аналитического программирования;

б) неполной адекватности модели технологической среды (в конечном счете, именно это определяет позиционную точность разрабатываемой программы).

Суммарное влияние перечисленных источников погрешностей может привести к весьма существенным отклонениям составленной программы от желаемого результата. Для того, чтобы систему аналитического программирования можно было использовать в практической работе, общая погрешность должна быть снижена до величины, позволяющей компенсировать ее за счет автоподстройки.

Для достижения этой цели необходимо несколько условий. Во-первых, следует повысить значение позиционной точности робота. На этот показатель влияют точность изготовления манипулятора, разрешающая способность контроллера и вычислительная точность микропроцессора устройства управления. Во-вторых, требуются более надежные методы определения параметров положения объектов, составляющих технологическую среду. В-третьих, необходимо использовать подсистемы очувствления, позволяющие компенсировать остаточные погрешности. Повышение качества компонентов, с которыми должна работать роботизированная система, также положительно сказывается на ее рабочих характеристиках.

20.5. Обзор существующих систем

В настоящее время ни одна из систем аналитического программирования роботов общего назначения не тиражируется в промышленном масштабе. Некоторые из них используются на практике (например, ВАЛ [6] и СИГЛА [7]), но большинство пока не вышло из стадии разработки и развития. В этом разделе описываются некоторые наиболее известные системы и их свойства. Рассматриваются системы ГЕОМЭП [8], РОБЕКС [9], РАПТ [10], ГРАСП [11], КЭТИА [12], АУТОПАСС [13], ЭНИМЕЙТ/ПЛЭЙС [14] и АЛ [15].

В этом списке большинство принадлежит системам, разработанным в европейских странах, и, конечно, он не претендует на полноту. В США и Японии разработаны системы аналитического программирования «Имитатор действий робота» [16], ЭНИМЕЙТОР [17], ЛАМА [18], ЛМ [19] и ПЛАУ [20]. Система лингвистического программирования АМЛ, разработанная фирмой ИБМ, подробно описывается в гл. 21.

Как правило, в системах аналитического программирования используется либо графическое, либо лингвистическое представление исходных и промежуточных данных.

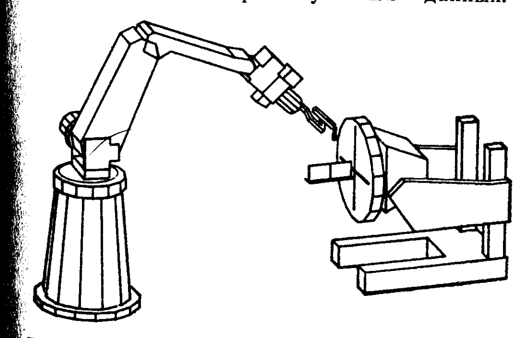


Рис. 20.1. Отображение моделей робота и окружающей его среды на экране графического дисплея. Изображен робот *T3* фирмы «Цинциннати милакрон» и сварочный позиционер с установленной на нем деталью. Изображение получено с помощью системы ГРАСП

Лингвистический подход предполагает составление описания программы робота на языке высокого уровня, построенном по тем же принципам, что и современные алгоритмические языки. Это позволяет легко описывать процедуры обработки данных и вычислительные алгоритмы. Существуют средства описания параллельных процессов и взаимодействия с подсистемами очувствления. Пользователь-программист описывает геометрические объекты, их отношения и выполняемое задание на языке, состоящем из операторов, по синтаксису и семантике близких к предложениям английского языка. Например, на языке РОБЭКС часть описания задания обслуживания [21] выглядит следующим образом:

```
START)ONSIG/EVENT,2,JMP,WZM1
    WZM1)GOTO/P2
        CLOSGR
  PUT/PAL, TEACH
        GOTO/P1
        CLOSGR
        GOTO/P2
        OPENGR
        GOTO/SAFP.
```

В этом фрагменте робот ждет получения сигнала от станка (*P2*), получив его, подводит манипулятор к станку, захватывает обработанную деталь, укладывает на палету в заранее определенном месте, переводит манипулятор к ленте транспортера (*P1*), захватывает очередную заготовку, переносит ее к станку, загружает его и возвращается в безопасное положение (*SAFP*).

В составе некоторых лингвистических систем имеются подсистемы графического моделирования. Они используются для проверки программ, сгенерированных по описаниям на входном языке системы, на соблюдение ограничений и отсутствие столкновений манипулятора с объектами. По результатам графического моделирования проводится корректировка программ. Проверенные программы преобразуются в промежуточный формат. Затем они с помощью постпроцессоров переводятся в форматы устройств управления конкретных роботов.

Графический подход предполагает составление описания задания робота средствами интерактивной графики. Модель робота и окружающей его среды отображается на экране графического дисплея. Пример подобного изображения приведен на рис. 20.1. Программирование ведется в режиме диалога, с использованием команд меню, светового пера, функциональной клавиатуры и других графических устройств. Такой подход обладает большим преимуществом — он обеспечивает программисту оперативную визуальную обратную связь. Как правило,

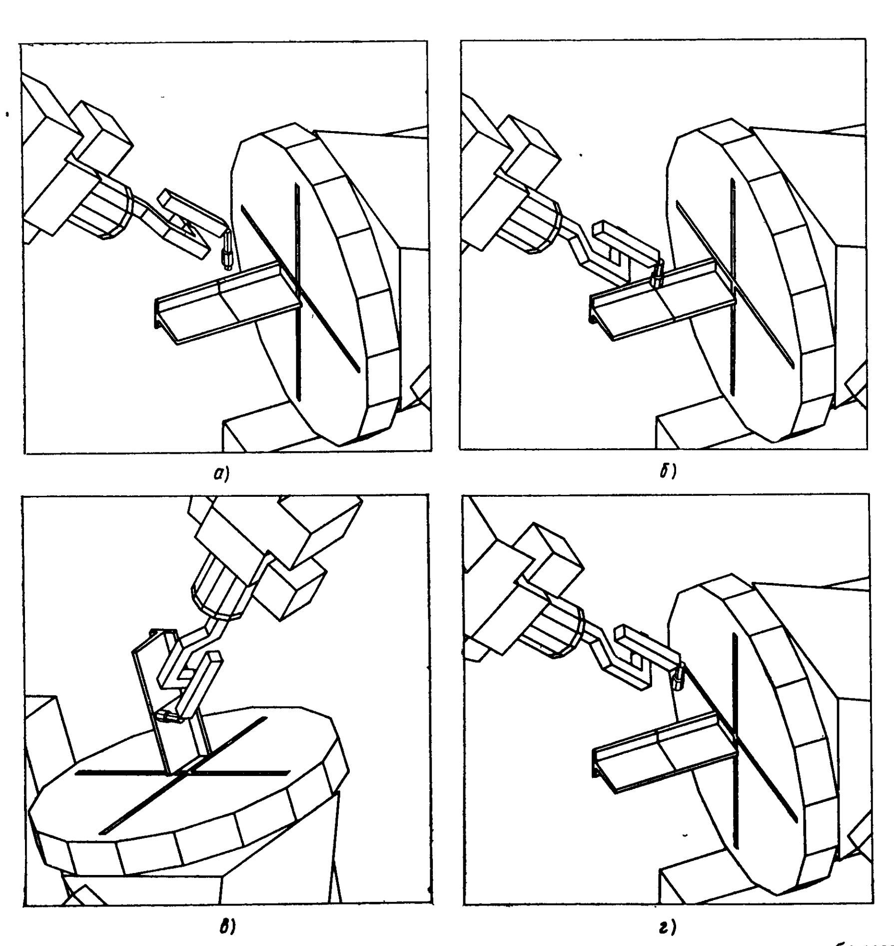


Рис. 20.2. Набор изображений рабочей зоны, соответствующих выполнению роботом задания, включающего в себя операции дуговой сварки:
а — исходное положение; *б* — начало сваривания; *в* — окончание сваривания; *г* — возврат в исходное положение

задание описывается набором изображений (рис. 20.2, *а* — *г*). Каждое изображение соответствует одному перемещению. Для построения полной программы робота в нее вводятся текстовые команды, описывающие различные операции: сварку, захватывание, отпускание и др. Внутренний формат представления программы нетекстовый, но с помощью специальных постпроцессоров он может быть преобразован в форматы устройств управления так же, как в лингвистических системах программирования.

В табл. 20.1 приведены данные о возможностях систем аналитического программирования. Следует заметить, что информация, использованная при ее составлении, бралась из самых различных источников, и поэтому может содержать ошибки. Более детально с характеристиками перечисленных систем можно ознакомиться в посвященных им публикациях (см. выше).

Все возможности разделены на четыре группы: относящиеся к подсистеме геометрического моделирования, относящиеся к подсистеме моделирования робота, относящиеся к системе программирования и прочие. Для сравнения были выбраны возможности, обеспечивающие эффективность эксплуатации системы аналитического программирования (см. разд. 20.3).

20.5.1. Подсистема геометрического моделирования

В той или иной форме подсистема геометрического моделирования имеется во всех системах. Она используется для построения модели технологической среды, по которой в процессе работы системы определяются параметры положения всех объектов. Для построения полных трехмерных моделей объектов необходима подсистема объемного моделирования. Трехмерные модели объектов используются при проверке программы на отсутствие столкновений. Кроме того, при графическом моделировании удаление невидимых линий возможно только при использовании трехмерных моделей объектов.

20.5.2. Подсистема моделирования робота

Подсистема моделирования робота позволяет описывать структуру робота, тем самым позволяя системе управлять его перемещениями. В систему вводится кинематическое описание робота, включающее в себя структуру звеньев манипулятора, диапазоны их перемещений и ограничения на скорости перемещений. Управление манипулятором осуществляется посредством задания положения рабочего органа и его ориентации в пространстве. Соответствующие этому положению смещения звеньев рассчитываются автоматически.

В системах АЛ, АУТОПАСС и РАПТ есть возможность задавать целевые положения манипулятора, но подсистема моделирования робота отсутствует. Следовательно, в процессе разработки программы с использованием этих систем нельзя утверждать, что эта программа может быть выполнена роботом. Подсистемы моделирования робота разделены на кинематические, контурные и универсальные. Кинематиче-

20.1. Возможности систем аналитического программирования

Возможности	АЛ	ЭНИМЕЙТ/ПЛЭЙС	АУТОПАСС	КЭТИА	ГРАСП	РАПТ	РОБЭКС	ГЕОМЭП
Подсистема геометрического моделирования: плоских тел объемов	+	+	+	+	+	+	+	+
Подсистема моделирования робота: кинематическая контурная универсальная		+ + +		*R* + +	+ *R* +		+ + +	+ +
Система программирования: на уровне манипулятора на уровне объекта с лингвистическим вводом с графическим вводом с использованием датчиков	+ + +	+ +	+ + +	+ +	+ + *D*	+	+ *R*	+
Прочие возможности: контроль диапазонов вывод управляющей информации динамическое выявление столкновений координированное управление	+ +	+	+ *R*	+ *D*	+ *D* *D* +	+	+ + *D*	+ + *R*
Подсистема графического моделирования		+		+	+		+	+

Условные обозначения: «+» — имеется в системе; *R* — имеется в ограниченном объеме; *D* — разрабатывается.

ская подсистема обеспечивает моделирование робота в режиме позиционного управления. Контурная подсистема позволяет управлять движением манипулятора в любой точке траектории. Универсальная подсистема предназначена для моделирования различных роботов.

20.5.3. Система программирования

В этом разделе таблицы системы классифицируются по уровню программирования (см. разд. 2.2). Кроме того, отражены способ ввода информации (лингвистический или графический) и возможность описания взаимодействия с подсистемами очувствления.

20.5.4. Прочие возможности

К этой группе отнесены возможности, которые по различным причинам не попали в предыдущие группы.

Проверка на соблюдение рабочих диапазонов звеньев. Предполагается введение в подсистему моделирования робота ограничений на перемещение отдельных звеньев манипулятора и контроль за их соблюдением в процессе перемещения.

Вывод управляющей информации. Наличие этой возможности говорит о том, что система может формировать массивы управляющей информации. Эта информация может быть представлена в формате устройства управления, в стандартном формате, не привязанном к конкретному роботу, или на более высоком уровне (например, на языке ВАЛ).

Динамическое выявление столкновений. Предполагается, что система способна обнаружить столкновения, возникающие не только в опорных, но и в любых промежуточных точках траектории.

Координированное управление. Предполагается, что система позволяет разрабатывать программы для координированного управления несколькими роботами. В частности, это предполагает наличие средств для описания параллельных процессов.

20.6. Графическая система автономной проверки программ

20.6.1. Введение

Одно из важнейших свойств систем аналитического программирования — возможность не только сгенерировать управляющую программу робота в том или ином формате, но и без использования робота убедиться в том, что эта программа исполнима. По мере возможности все затруднения, вызванные ограниченными диапазонами перемещения звеньев манипулятора, недоступностью тех или иных объектов, столкновениями, временными ограничениями и т. п., должны быть устранены на этапе разработки программы. Подсистемы графического моделирования, дополненные средствами моделирования робота, предоставляют для этого большие возможности. В настоящее время разрабатывается несколько таких систем. С их помощью можно автономно (без использования робота) проверять разработанные управляющие программы и в случае необходимости строить графические изображения робота в процессе выполнения задания. В этом разделе описывается одна из таких систем — ГРАСП, разработанная в Ноттингемском университете. Это универсальная система, предназначенная для моделирования различных роботов.

20.6.2. Моделирование объемов

Система ГРАСП использует простой пакет программ геометрического моделирования трехмерных тел. Любой объект рассматривается им как состоящий из конечного числа элементарных объемов — примитивов. Примитив может представлять собой кубоид, правильную n-гранную призму, неправильную призму или любой замкнутый объем. Все объекты описываются совокупностями плоских граней, а цилиндры и тела вращения аппроксимируются примитивами (рис. 20.3).

Примитивы соединяются друг с другом в определенных геометрических отношениях в соответствии с иерархией, представленной древовидной структурой. Соединенные примитивы в дальнейшем рассматриваются как единое целое. Каждому телу ставится в соответствие связанная с ним система прямоугольных координат. Пользователь может изменять положение и ориентацию тел, относящихся к любому уровню дерева модели, как в связанных с этими телами системах координат, так и в системах координат других тел.

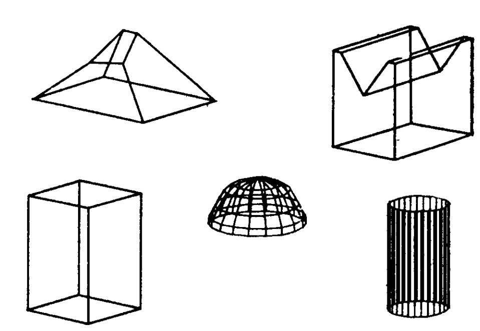


Рис. 20.3. Некоторые из использующихся в подсистеме моделирования объемов системы ГРАСП: кубоид, тело вращения, цилиндр, полипризма

Каркасное графическое изображение модели отображается на векторном графическом дисплее с блоком регенерации или запоминающей трубкой. Пользователь может выбирать направление проецирования и масштаб, что позволяет рассматривать модель с любой удобной точки зрения. Возможно программное выделение наиболее важных участков изображения и построение изображений с убиранием невидимых линий.

20.6.3. Моделирование робота

Поскольку система ГРАСП предназначена для моделирования робота, в ее состав должны входить средства описания особенностей различных роботов. Базовый язык описания тел (см. выше), операторы которого близки по структуре к предложениям английского языка, включает в себя лингвистические средства для описания структуры звеньев, диапазонов их перемещений, а также других характеристик конкретных роботов. Звенья манипулятора представляются в виде тел, описание которых составляется по общим правилам системы геометрического моделирования, и включаются в состав модели робота. Для построения такой модели не требуется знания лежащих в ее основе математических методов. Для хранения модели в системе используется удобный формат, предложенный Денави и Хартенбергом [2]. Пользователь ведет диалог с системой в терминах им же определенных геометрических объектов, не вдаваясь в тонкости реализации операций, выполняемых над ними.

В качестве рабочего органа может быть выбрано любое входящее в модель тело. Оно присоединяется к манипулятору, а некоторая точка, заданная в системе координат тела, соответствующего звену манипулятора, на которое установлен рабочий орган, рассматривается в дальнейшем как центр инструмента. Система координат, связанная с центром инструмента, используется для задания ориентации рабочего органа.

20.6.4. Управление роботом

Существует несколько способов управления положением робота в процессе моделирования. Один из них позволяет задавать перемещения отдельных звеньев (угловые или линейные). На практике этот метод почти не используется — слишком сложно привести центр инструмента в необходимую точку.

Наиболее удобный способ управления предполагает задание положения центра инструмента. Система ГРАСП автоматически определяет параметры положений всех звеньев манипулятора, обеспечивающие совмещение центра инструмента с заданной точкой. Для этого все возможные структуры роботов разбиты на несколько классов. При вводе описания конкретного робота производится анализ структуры его манипулятора, и в модель робота вводится код класса. В процессе моделирования по этому коду выбираются соответствующие алгоритмы расчета смещений звеньев, соответствующих заданной целевой точке.

Положение рабочего органа может определяться не только заданием координат центра инструмента. Вместо этого можно ссылаться на объект, с которым робот должен работать (программирование на уровне объектов). Этот метод однозначно определяет положение и ориентацию рабочего органа в момент захватывания или обработки объекта. Часто используется следующий прием программирования: средствами системы ГРАСП создается копия модели рабочего органа, которая затем совмещается с тем или иным объектом. Взаимное расположение объекта и копии рабочего органа можно проверить различными способами. После того как будет достигнуто желаемое взаимное расположение, фиксируются параметры положения копии рабочего органа, которые используются в дальнейшем как координаты центра инструмента.

В модели робота может быть предусмотрено несколько рабочих органов. В каждый момент для моделирования используется только один из них.

20.6.5. Составление описания программы робота

Первый этап разработки управляющей программы робота — определение последовательности занимаемых манипулятором положений и выполняемых действий (например, захватываний и отпусканий объектов). В терминологии системы ГРАСП такая последовательность называется следом. В каждом из положений определяются координаты центра инструмента и ориентация рабочего органа. Данные запоминаются не в мировых координатах, а в системе, связанной с некоторым элементом модели технологической среды (например, с деталью или основанием робота). Такое решение

позволяет не только повторять моделирование, но и изменять технологическую среду (например, за счет изменения взаимного расположения ее элементов). Все входящие в след шаги задаются положениями центра инструмента и вследствие этого не зависят от конкретных особенностей робота. Поэтому в процессе моделирования можно, не меняя описание следа, менять расположение робота и даже его тип. Можно изменять способ крепления рабочего органа к манипулятору. Описание следа можно редактировать, вставляя, удаляя и корректируя отдельные шаги.

Попытки привести рабочий орган в недостижимую точку приводят к выдаче соответствующей диагностики. Таким образом выполняется проверка соблюдения ограничений в процессе моделирования. В случае возникновения затруднений, можно попытаться изменить технологическую среду, переместив ее элементы, изменив способ крепления рабочего органа или воспользовавшись роботом другого типа. На этом этапе моделирования невозможно получить информацию о характере движения манипулятора в промежутках между заданными положениями или оценить время, необходимое для выполнения этих перемещений.

20.6.6. Контурное управление

На следующем этапе разработки программы определяется характер движения робота в промежутках между заданными положениями. Например, можно потребовать, чтобы при отработке некоторого шага центр инструмента перемещался по прямой с заданной скоростью. При этом определяются и записываются в память ограничения на скорость перемещения всех звеньев манипулятора. В другом варианте задания движения предполагается, что все звенья выполняют расчетное перемещение с максимальной скоростью, после чего останавливаются. Возможны и другие способы.

Поскольку движения манипулятора определяются траекторией перемещения центра инструмента, траектории движения каждого из звеньев могут быть достаточно сложными. Поэтому поведение отдельных звеньев модулируется с помощью кубических сплайнов, рассчитываемых по результатам интерполяции положения манипулятора в процессе выполнения шага. Таким образом, можно определить положение любого звена в любой момент выполнения программы в целом и проверить, не нарушаются ли диапазоны его перемещения или ограничения скорости. Эти ограничения могут быть нарушены, например, в процессе движения рабочего органа по прямолинейной траектории, оба конца которой лежат в пределах рабочего пространства робота.

20.6.7. Управление движением в реальном масштабе времени

На следующем этапе поведение робота определяется в виде функции времени. Этот этап выполняется полностью автоматически. В качестве исходных данных используются информация о шагах, составляющих след, и скоростные характеристики робота. В результате формируется описание процесса. В ходе выполнения этапа оценивается длительность цикла и проверяется соблюдение ограничений на скорость перемещения отдельных звеньев.

До этого этапа предполагалось, что в каждый момент времени моделирования мог двигаться только один из роботов, входящих в модель технологической среды. Однако при выполнении задания может потребоваться одновременное выполнение действий несколькими роботами. В этом случае процессы, сформированные для каждого из роботов в отдельности, могут объединяться. Точно так же синхронизируются процессы, разработанные для вспомогательного оборудования (например, для ленточного транспортера). Объединяя процессы и повторяя моделирование, можно добиться желаемого взаимодействия всех элементов технологической среды. После этого результаты моделирования можно представить в виде мультипликационного фильма, показывающего, каким образом роботизированная система выполняет задание.

20.6.8. Предотвращение столкновений

В настоящей версии системы ГРАСП столкновения и пересечения рабочих пространств обнаруживаются программистом по изображениям, формируемым графической подсистемой. Области, в которых возможны столкновения, можно рассматривать в увеличенном масштабе и с любой точки зрения. Если процесс моделирования прервать в момент потенциального столкновения, можно программным способом проверить, не пересекаются ли интересующие программиста объекты. Поскольку разобраться в каркасных изображениях иногда бывает сложно, этим приемом пользуются довольно часто. Предполагается, что в следующей версии системы ГРАСП обнаружение столкновений будет полностью автоматизировано.

20.6.9. Режим аналитического программирования

В предшествующих разделах перечислены многие достоинства системы моделирования. К важнейшим из них относятся возможность решения задач, связанных с ограничениями рабочего пространства, столкновениями и несинхронностью действий на этапе разработки программы, и средства, позволяющие производить оперативную проверку нескольких вариантов выполнения различных действий с минимальными затратами. Кроме того, после завершения моделирования в системе имеется вся информация, необходимая для генерации управляющей программы робота. Поэтому представляется целесообразным расширение системы ГРАСП за счет введения в ее состав программ, генерирующих программу робота (в произвольном формате).

Возможные способы такого расширения представлены на рис. 20.4. Все они предполагают формирование программы робота по описанию следа, составленному в процессе моделирования.

Наиболее общий подход требует разработки программы преобразования внутреннего представления следа в формат, предусмотренный одним из международных стандартов. Одним из таких стандартов, проект которого в настоящее время подготавливается в г. Аахен, ФРГ, является *IRDATA*. По опыту предыдущих лет можно утверждать, что ни один из разрабатываемых в настоящее время стандартов не станет общепризнанным. Тем не менее систему достаточно дополнить модулями, формирующими программу в одном из широко распространенных форматов. Вне всякого сомнения, программы преобразования форматов будут разработаны в самых различных вариантах, учитывающих интересы всех групп пользователей.

Другой подход предполагает введение в состав системы ГРАСП набора постпроцессоров, преобразующих описание следа непосредственно в форматы устройств управления различных роботов. Перенос программ можно осуществлять на любом машинном носителе (например, перфоленте или магнитной ленте). Ценность каждого из

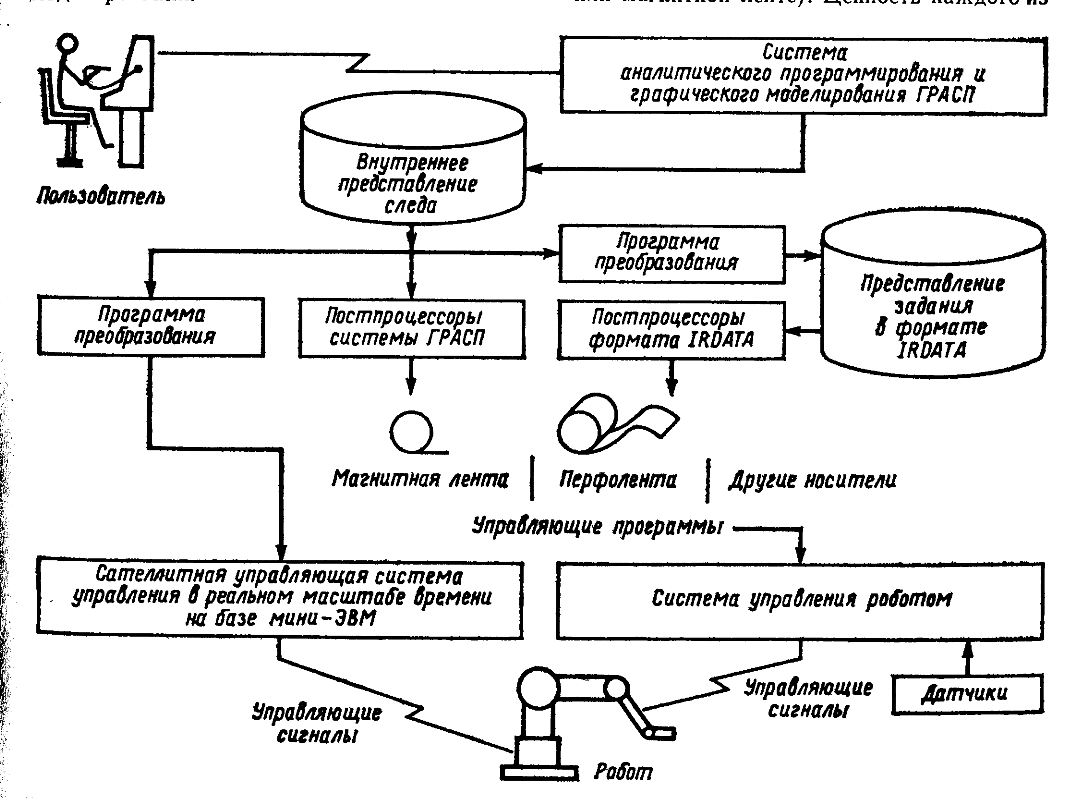


Рис. 20.4. Схематическое представление вариантов использования системы аналитического программирования ГРАСП

построцессоров будет определяться широкой номенклатуры изделий, изготавливаемых с применением того или иного робота.

Третий подход предполагает непосредственное подключение устройств управления одного или нескольких роботов к системе ГРАСП. Такое подключение должно осуществляться через сателлитную управляющую систему на базе мини- или микро-ЭВМ. Кроме того, должна быть разработана программа преобразования данных в формат этой управляющей системы. Такое решение дает возможность сократить сроки комплексной отладки программ, позволяя вносить в них изменения непосредственно на уровне системы ГРАСП. Кроме того, это повышает степень централизации управления системы с несколькими роботами.

Уже проведены эксперименты по управлению сварочным роботом с помощью координатной информации, полученной из системы ГРАСП. На простейших деталях была достигнута позиционная точность до 3 мм. В ходе экспериментов возникли некоторые затруднения. В частности, оказалось, что сварочная головка была установлена на манипулятор с некоторой погрешностью. Это привело к систематической погрешности позиционирования сварочного инструмента. С этим затруднением удалось справиться, установив между сварочным инструментом и манипулятором регулируемый переходник, с помощью которого выравнивалось положение рабочего органа. Другое затруднение заключалось в том, что сварочный позиционер (поворотный стол), на котором закреплялись свариваемые детали, не имел программного управления. Тем не менее были получены обнадеживающие результаты. Следует ожидать, что для роботов второго поколения с повышенной точностью и совершенными подсистемами очувствления трудоемкость дополнительной отладки управляющих программ сильно сократится.

20.7. Заключение

Без развития систем аналитического программирования процесс внедрения промышленных роботов существенно замедлится. Хотя сегодня большинство таких систем находятся в стадии разработки и совершенствования, некоторые из них уже используются на практике. Можно с уверенностью утверждать, что с увеличением числа роботов второго поколения системы аналитического программирования получат широкое распространение.

Некоторые факторы могут ускорить этот процесс. Совершенствование конструкции роботов позволит замкнуть цикл управления. Соглашения по стандартизации форматов представления информации, передаваемой от системы программирования в устройства управления роботов, позволят расширить внедрение последних в различных отраслях промышленности. По мере уточнения требований, предъявляемых к системам аналитического программирования, их развитие будет ускоряться.

Необходимость применения систем аналитического программирования во многом обусловлена несовершенством современных методов программирования в режиме обучения. Аналитическое программирование повышает степень использования важнейшего свойства робота — его технологической гибкости, и позволяет вывести программиста за пределы потенциально опасной зоны действия робота. Основным фактором, определяющим скорость развития систем аналитического программирования, остается степень их соответствия требованиям промышленности.

Благодарности. Авторы выражают признательность Совету по научным и инженерным исследованиям в Великобритании за финансовую поддержку проекта ГРАСП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Latombe, J. C., Une Analyse Structuree d'Outils de Programmation pour la Robotique Industrielle, *Proceedings of the International Seminar on Programming Methods and Languages for Industrial Robots*, IRIA, Rocquencourt, France, June 1979.
2. Denavit, J., Hartenberg, R. S., A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices, *Journal of Applied Mechanics*, June 1955, pp. 215—221.
3. UK — France — Germany, Working Party on Robot Assembly Languages, *A Programme of Work to achieve a Common Robot Assembly Language System*, Science and Engineering Research Council, U. K., September 1982.
4. British Standard 5110 — Specification for Programming Languages for the Numerical Control of Machines (Equivalent to ISO 3592 and 4343), 1979.
5. IRDATA — General Structure and Types of Records, Draft VDI 2863, West Germany, 1982.
6. *Users Guide To VAL-II*, The Unimation Robot Programming and Control System, Danbury, Connecticut, September 1982.

7. Salmon, M., Sigla. The Olivetti SIGMA Robot Programming Languages, *Proceedings of the 8th ISIR*, Stuttgart, IFS Ltd., Kempston, Bedford, England, 1978.
8. Sata, T., Kimura, F., and Amano, A., Robot Simulation System as a Task Programming Tool, *Proceedings of the 11th ISIR*, Tokyo, 1981.
9. Weck, M., Eversheim, W., and Zuehlke, D., ROBEX — An Off-line Programming System for Industrial Robots, *Proceedings of the 11th ISIR*, Tokyo, 1981.
10. Popplestone, R. I. and Ambler, A. P., A Language for Specifying Manipulations, *DAI Research Paper 161* Department of Artificial Intelligence, University of Edinburgh, U. K., 1981.
11. Yong, Y. F. and Bonney, M. C., Simulation — Preventing Some Nasty Snarl-Ups, *A Decade of Robotics. — A Special 10th Anniversary Issue*, IFS Publications Ltd., Kempston, Bedford, England, 1983.
12. Borrel, P., Liegeois, A., and Dombre, E., The Robotics Facilities in the CAD-CAM CATIA System, *Developments in Robotics 1983*, IFS Publications Ltd., Kempston, Bedford, England.
13. Lieberman, L. I. and Wesley, M. A. AUTOPASS: An Automatic Programming System for Computer Controlled Mechanical Assembly, *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 21, No. 4, July 1977, pp. 321—323.
14. Kretch, S. J., Robotic Animation, *Mechanical Engineering*, August 1982.
15. Mujitaba, M. S., Current Status of the AL Manipulation Programming Language, *Proceedings of the 10th ISIR*, March 1980.
16. Soroka, B. I., Debugging Robot Programs with a Simulator, *Autofact West Conference*, Society of Manufacturing Engineers, Anaheim, California, 1980.
17. Bathor, M., and Siegler, A., "Graphic Simulation for Robot Programming", *4th British Robot Association Annual Conference*, Brighton, U. K., May 1981.
18. Lozano-Perez, T. and Winston, P. H., LAMA: A Language for Automatic Mechanical Assembly, *Proceedings of the 5th IJCAI*, Boston, Massachusetts, 1977, pp. 710—716.
19. Latombe, J. C. and Mazer, E., LM: A High-Level Programming Language for Controlling Assembly Robots, Tripartite Robotics Seminar, Stuttgart, February 1981.
20. Abe R., Ueno, S., Tsujikado, S., and Tagaki, H., The Programming Language for Welding Robot, *Proceedings of the 11th ISIR*, Tokyo, 1981.
21. Eversheim, W., Weck, M., Scholing, H., Zuehlke, D., and Muller, W., Off-line Programming of Numerically Controlled Industrial Robots Using the ROBEX-Programming-Systems, *Annals of the CIRP*, January 1981.

Глава 21

ЯЗЫК СТРУКТУРНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ РОБОТОВ

С. Бакли, Г. Коллинз, фирма ИБМ, г. Бока Ратон, шт. Флорида

21.1. Введение

АМЛ — структурированный диалоговый язык программирования высокого уровня, разработанный фирмой ИБМ для использования в робототехнических системах. В языке использованы функции языков программирования общего назначения: различные типы данных и операторов, структуры управления, средства ведения диалога и управления вводом-выводом, а также системные идентификаторы, упрощающие понимание программы. Кроме того, АМЛ обеспечивает работу с дополнительными ресурсами, необходимыми для выполнения задания роботом. К ним относятся средства управления перемещением, средства обработки сенсорной информации и средства связи.

Сегодня в области программирования роботов используется большое количество робототехнических языков программирования (см. гл. 20). Тем не менее ни один из этих языков не позволяет осуществлять программирование на уровне задания. Вопросы, связанные с языками программирования на уровне задания (т. е. лингвистического описания того, как должно быть выполнено задание), находятся пока еще в стадии раз-

работки (см. гл. 22). Чтобы удовлетворить запросы пользователей, необходимо расширять номенклатуру встроенных вычислительных функций общего назначения в языках программирования более низкого уровня. Эти основные функции позволяют программисту создать программную «надстройку» над управляющей системой робота и, таким образом, упростить его программирование, одновременно расширяя его функциональные возможности. АМЛ предоставляет обширный набор средств программного управления, необходимых программисту для решения поставленной задачи. Системные подпрограммы обработки данных обеспечивают их преобразование в форму, принятую в устройстве управления. Для упрощения работы программиста имеются средства разработки и отладки программ. Системные подпрограммы управления памятью позволяют повысить эффективность сложных программных систем. Эти средства дают возможность пользователю генерировать свои собственные подпрограммы и использовать их совместно со стандартными подпрограммами языка АМЛ или вместо них. Подпрограммы пользователя могут вызываться итеративно или рекурсивно. Пользователь имеет возможность создавать гибкие инструментальные средства и использовать их прн разработке программ.

В настоящее время робототехнические языки программирования в зависимости от используемой в них методологии решения задач классифицируются на пять уровней [2]. На рис. 21.1 приведена схема этой классификации.

Уровень 1. Уровень микроЭВМ; от пользователя требуется описание действий робота на языке программирования микроЭВМ и точное определение всех вычислений и преобразований данных, необходимых для выполнения задания.

Уровень 2. Уровень позиционного управления: для выполнения задания пользователь должен обучить робот методом проводки по заданным траекториям с помощью пульта-приставки или мнемонической рукоятки. Роботы с такими системами программирования наиболее распространены.

Уровень 3. Уровень программирования с использованием стандартных перемещений; пользователь имеет возможность задавать траектории перемещения без процесса обучения. Обычно для этого требуется простой язык программирования (типа БЕЙСИК), расширенный одной или несколькими командами перемещения.

Уровень 4. Уровень структурного программирования; обеспечивает большую гибкость программирования. Управляющие блоки, структуры и сложные структуры

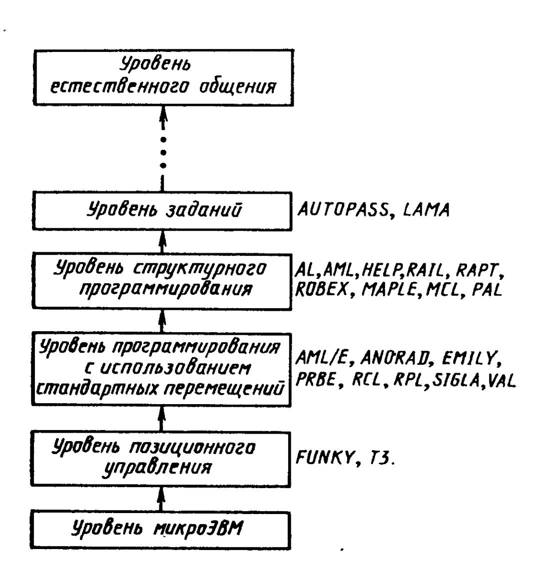


Рис. 21.1. Классификация робототехнических языков программирования

данных дают возможность описывать вычисления и принятие решений на более высоком уровне.

Уровень 5. Уровень заданий; пользователь имеет возможность описывать задание в терминах языка, близкого к естественному, а процедуры более низкого уровня (обработка сенсорной информации, преобразование координат) остаются скрытыми для пользователя. Система определяет последовательность выполнения задания с помощью модели окружающей среды н входящих в нее объектов. Работы по созданию таких систем программирования роботов пока еще не вышли из стадии исследований.

С точки зрения пользователя программирование на языках пятого уровня является идеальным, потому что практически отпадает необходимость вдаваться в подробности задания. Однако, пока не существует доступных реализаций языков пятого уровня, пользователь вынужден использовать языки программирования четвертого или более низкого уровня. Язык программирования АМЛ можно рассматривать как типовой язык структурного программирования.

21.2. Функции, реализованные в робототехническом языке структурного программирования

Ниже описывается ряд возможностей уровня структурного программирования (уровень 4). Большинство из них реализо-

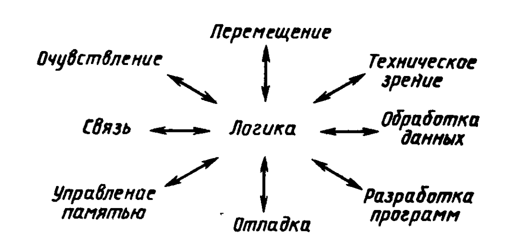


Рис. 21.2. Основные функции системы структурного программирования

ваны в АМЛ. Приведенные примеры и пояснения подтверждают, что язык АМЛ действительно является языком структурного программирования роботов.

Некоторые средства системы структурного программирования представлены на рис. 21.2. Перечислены основные средства систем программирования общего назначения (например, обработка данных, генерация программ, отладка) и специфические средства, необходимые для управления роботом (например, перемещение, обслуживание датчиков, связь, техническое зрение). В реализацию языка АМЛ для системы ИБМ 7565 включены перечисленные на рисунке средства, кроме технического зрения. Экспериментальная версия системы АМЛ реализует и эти средства [10].

В центре схемы программных средств языка помещена логика, как средство управления программой. Средства управления программой в сочетании с другими функциями системы создают некое подобие интеллекта. Программа, написанная пользователем на языке программирования уровня 4 для каждого задания, представляет собой управляющий алгоритм, который будет интерпретироваться устройством управления робота в ходе выполнения задания. Как правило, аварийные завершения задания возникают из-за того, что программист предоставил роботу недостаточное количество информации для выполнения задания. При программировании на языке уровня 5 таких проблем не возникает, поскольку определение полной последовательности выполнения задания является функцией системы. Поэтому особенно важно, чтобы в языке программирования уровня 4 были реализованы удобные средства программного управления, с помощью которых пользователь сможет достичь желаемых результатов.

21.2.1. Логика

Ниже будут рассмотрены некоторые структуры управления, которые используются в современных языках программирования для описания алгоритмов принятия решений. Существуют три типа управляющих структур: последовательные, параллельные и асинхронные. В АМЛ используются последовательные и асинхронные структуры.

Последовательное управление. При последовательном управлении выполнение программы производится по заданной последовательности шагов. Стандартными управляющими структурами языка структурного программирования при последовательном управлении являются переходы, условные операторы *IF* и циклы *WHILE*.

В АМЛ элементарной выполняемой структурой является выражение. Выражение представляет собой последовательность констант, переменных, вызовов процедур и операций. Приведем примеры выражений:

$$12$$
$$36.2$$
$$I+3$$
$$MOVE(JX,\ 10.0)$$

Первые два выражения в списке являются константами: одна — целой, а другая — действительной. Третье представляет собой операцию сложения переменной и константы. Четвертое представляет собой вызов процедуры *MOVE*. При обращении к процедуре *MOVE* задаются два параметра: номер звена *JX* и абсолютная координата целевой точки перемещения 10.0.

Оператор — это выражение, которое заканчивается точкой с запятой. Приведем примеры операторов:

$$12;$$
$$36.2;$$
$$I+3;$$
$$MOVE(JX,\ 10.0);$$

Операторы могут быть сгруппированы и определены как одна вызываемая единица. Такая единица называется процедурой.

В процедуре группируются часто используемые последовательности операторов. АМЛ предоставляет пользователю набор встроенных системных процедур, к которым можно обращаться сразу после завершения работы программы первоначальной загрузки (*IPL*). Системными процедурами можно пользоваться вместо процедур, составленных пользователем, или вместе с ними, или в дополнение к последним. Приведем пример процедуры пользователя:

```
USERMOVE: SUBR(J, G);
MOVE(J, BASE+G);
END;
```

Эта процедура аналогична системной процедуре *MOVE*, только в пользовательской процедуре *USERMOVE* координата точек конечного положения задается в виде сме-

щения от заданного базового положения — *BASE*, тогда как координата точки конечного положения в процедуре *MOVE* задается как абсолютная координата в рабочем пространстве. (В примере описания процедуры *USERMOVE J* и *G* — определенные пользователем имена, *SUBR* и *END* — ключевые слова, необходимые для задания процедуры.)

Обращение к пользовательской процедуре имеет такой же синтаксис, как и обращение к системной процедуре. Отсюда следует, что без некоторой предварительной информации программист не сможет сразу определить, что

```
MOVE(ARM, 0);
```

есть обращение к системной процедуре, а

```
USERMOVE(ARM, 0);
```

есть обращение к процедуре пользователя. Использование одинакового синтаксиса сокращает тексты программных модулей на языке АМЛ, поскольку написанными одним пользователем процедурами может воспользоваться другой пользователь, рассматривая их как системные.

В языке АМЛ можно использовать вложенные и рекурсивные процедуры. В приведенном ниже примере описывается решение задачи Ханойской башни, в которой требуется перенести пирамиду из дисков различного диаметра с одного стержня на другой (с использованием промежуточного стержня), при этом нельзя укладывать диск большего диаметра на диск меньшего диаметра.

```
— — НАЗНАЧЕНИЕ: РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ
      ХАНОЙСКОЙ БАШНИ
— —
— — ПАРАМЕТРЫ:
                  N, ЦЕЛОЕ, ЧИСЛО
                  ПЕРЕМЕЩАЕМЫХ
                  ДИСКОВ
— —               Q, ЦЕЛОЕ, НОМЕР
                  ПОСЛЕДНЕГО СНЯ-
                  ТОГО ДИСКА
— —               R, ЦЕЛОЕ, НОМЕР
                  ПОСЛЕДНЕГО УСТА-
                  НОВЛЕННОГО ДИ-
                  СКА
— —               C, ЦЕЛОЕ, НОМЕР
                  ДОСТУПНОГО МЕ-
                  СТА
— —               AT, ЦЕЛОЕ, НОМЕР
                  ТЕКУЩЕГО ДИСКА
— —
— —               ВОЗВРАЩАЕМОЕ
                  ЗНАЧЕНИЕ: ⟨⟩
— —
— —
```

```
TOWER: SUBR(N, Q, R, S, AT);
    IF N EQ 1 THEN RETURN(MOVEIT
    (AT, Q, R)):
    TOWER(N—1, Q, S, R, N—1);
    MOVEIT(N, Q, R);
    TOWER(N—1, S, R, Q, N—1);
    END;
```

В этом примере *MOVEIT* — пользовательская процедура, выполняющая физическое перемещение диска.

Передача параметров в АМЛ осуществляется или значением, или ссылкой. Рассмотрим пример:

```
S: SUBR(!A, B);
   .
   .
   .
   A = 2;
   B = 3;
   END;
```

В результате обращения:

```
S(X, Y);
```

изменится значение *X*, а *Y* не изменится. (Восклицательный знак перед формальным параметром означает, что параметр передается ссылкой.) Тип параметров определен не полностью, т.е. при компиляции программы контроль соответствия типа данных не выполняется; тип данных полностью определяется во время выполнения. Это позволяет писать процедуры, выполняющие различные функции в зависимости от типов входных данных, например,

```
S: SUBR(P);
   IF ?P EQ 1 THEN ...
   ELSE IF ?P eq 2 THEN ...
```

Операция «?» выдает тип следующей за ней переменной. Параметры считаются заданными, если для них определены значения по умолчанию. Например, в следующей процедуре

```
S: SUBR(J, G DEFAULT QGOAL(J));
```

второй параметр, если он не будет явно задан при обращении к процедуре, по умолчанию будет иметь значение, равное результату выполнения системной процедуры *QGOAL* с первым параметром.

Результатом выполнения всех процедур языка *АМЛ* является возвращаемое значение. Для возврата значения после вызова процедуры используется системная процедура *RETURN*. Если в выполняемой процедуре *RETURN* не вызывается, то возвращается значение ⟨⟩ (пустое значение, см. ниже). Это позволяет использовать в вызываемой процедуре результаты выполнения других процедур, сокращая текст программы и количество временных переменных.

Все управляющие структуры программы на языке АМЛ рассматриваются как выражения, т. е. их значения доступны при вычислении выражений, содержащих управляющие структуры. Этой возможности нет во многих других языках программирования, в которых элементарной управляющей структурой языка является оператор. Таким образом, в АМЛ снимаются некоторые стандартные ограничения. Например, в операторе

```
C = IF TEST THEN A ELSE B;
```

результат вычисления условного выражения (либо *A*, либо *B*) будет присвоен переменной *C*. В другом примере

```
(IF TEST THEN A ELSE B) = C;
```

присваивание значения *C* производится по результату вычисления условного выражения (либо *A*, либо *B*). Программисту не надо помнить, в каком контексте можно использовать условное выражение, а в каком нет — он может использовать его всюду.

Последовательное управление в программе на АМЛ обеспечивается следующими выражениями и системными процедурами.

BEGIN ... END. Ключевые слова *BEGIN* и *END* используются для выделения группы операторов, которые в дальнейшем будут рассматриваться как единое выражение.

IF ... THEN ... ELSE. Условное выражение используется при принятии решений.

WHILE ... DO. Позволяет многократно вычислять выражение, до тех пор, пока выполняется условие.

REPEAT ... UNTIL. Позволяет многократно вычислять выражение до тех пор, пока условие не будет выполнено.

BRANCH. Системная процедура *BRANCH* осуществляет передачу управления на заданную метку.

RETURN. Системная процедура *RETURN* обеспечивает возврат значения в вызывающую процедуру. Если процедура *RETURN* используется с параметром, то этому параметру присваивается выработанное процедурой значение и он передается в вызывающую процедуру.

QUIT. Системная процедура *QUIT* осуществляет возврат в вызывающую процедуру любого уровня, и управление передается следующему оператору на этом уровне.

CLEANUP. Системная процедура *CLEANUP* вызывается при прекращении работы процедуры текущего уровня и выполняет действие по закрытию использовавшихся файлов, освобождению динамически распределенной памяти и другие. Процедуру *CLEANUP* следует выполнять при принудительном завершении процедуры из процедуры более высокого уровня, например, в результате выполнения процедуры *QUIT*. В приведенном ниже примере при входе в процедуру присоединяется канал ввода/вывода, а затем этот канал освобождается с помощью процедуры *CLEANUP*. (Каналы ввода/вывода используются для считывания записанных ранее данных в задачах управления данными. Более подробно об этом ниже.)

```
APPLIC: SUBR;
    CH: NEW 0;
     APPLCLEAN: SUBR;
         IF CH NE 0 THEN CLOSE(CH);
         END;
    CLEANUR('APPLCLEAN2');
    CH=OPEN('DATAFILE.USER01');

     .
     . (фрагмент программы управления
    данными)
     .
    END;
```

В АМЛ в качестве параметров процедур могут передаваться имена процедур. Поэтому можно построить, например, такую последовательность управляющих операторов:

```
BIN2HEX: SUBR(VAL);
   ALPHA : NEW ⟨'0', '1', '2', '3', '4', '5',
                '6', '7', '8', '9', 'a', 'b',
                'c', 'd', 'e', 'f'⟩;
   RETURN(APPLY('!',     ALPHA(((VAL
                ROTL ⟨—12, —8, —4,0⟩)
                AND15)+1)));
   END;
```

Эта процедура преобразует десятичное число в шестнадцатеричную форму для печати. Эту процедуру можно использовать при отладке цифрового интерфейса робота с периферийным оборудованием.

Параллельное управление. При параллельном управлении допускается последовательное выполнение независимых программ. Например, при параллельном управлении возможен мультизадачный режим. Используя мультизадачный язык программирования, программист создает несколько программных сегментов, называемых задачами, и обеспечивает их независимое выполнение. Для синхронизации выполнения задач используются специальные флаги или семафоры, с помощью которых реализуется взаимная временная блокировка. С помощью флагов обеспечивается также монопольный доступ к системным ресурсам. Данные могут либо совместно использоваться различными задачами, либо для межзадачного обмена данными могут посылаться специальные сообщения. В языке

АМЛ параллельное управление не используется.

Асинхронное управление. При асинхронном управлении выполнение шагов программы зависит от происходящих в системе событий. Событиями считаются сбои оборудования, программные прерывания, прерывания от устройств и сигналы от датчиков о выходе значений параметров за границы («ловушки»). В однопрограммном режиме для обработки событий в программе задаются специальные точки входа.

Для создания процедуры, которой будет передано управление при срабатывании «ловушки», в языке АМЛ используется системная процедура *MONITOR*. Вызываемая процедура иногда называется процедурой обработки «ловушки». При вызове процедуры *MONITOR* может быть задана обработка нескольких типов прерываний от датчиков: срабатывание «ловушки» внутри абсолютного диапазона значений, при выходе из абсолютного диапазона значений, и при выходе из диапазона значений, заданного относительно текущих показаний датчика.

В языке АМЛ имеются системная процедура, с помощью которой можно задать процедуру обработки сбоев оборудования, и системная процедура, с помощью которой можно задать процедуру обработки программных прерываний.

21.2.2. Перемещение

В языке структурного программирования существует несколько способов задания перемещений. Ниже эти способы подробно описываются. Отметим, что в языке АМЛ реализованы все перечисленные способы, кроме одного.

Позиционное обучение. Простейший способ программирования робота заключается в обучении робота последовательности целевых положений, с последующим воспроизведением. Обычно процесс обучения выполняется одним из двух способов: проводкой манипулятора по траектории вручную (используется для сварочных роботов или роботов, занятых на окраске); или с использованием обучающего устройства (например, рукоятки управления или пульта-приставки).

При программировании на уровне языка структурного программирования результаты процесса позиционного обучения необходимо представить в виде программного сегмента. Таким образом, исходные данные и геометрическая информация объединяются с текстом программы, и в дальнейшем программа может по мере необходимости модифицироваться.

Позиционное обучение в АМЛ осуществляется нажатием соответствующих кнопок на обучающем пульте-приставке, в результате чего инициируется перемещение любого звена в положительном или отрицательном направлении. Системная процедура *GUIDE* обеспечивает связь программы с пультом-приставкой и позволяет задать параметры одного целевого положения за одно обращение. Процедура *GUIDE* возвращает значения параметров положения всех звеньев. Для обучения перемещению по всей траектории можно построить цикл, в который включить вызов процедуры *GUIDE* и запись возвращаемых результатов.

С помощью процедуры языка АМЛ можно организовать обучение в системе координат рабочего органа. При этом перемещения задаются относительно текущего положения рабочего органа.

Перемещения в координатах звеньев. Если перемещения звеньев робота осуществляются по осям декартовых координат *X*, *Y*, *Z* (например, для роботов модели *RS-1* или 7565 фирмы ИБМ), то также перемещения достаточно просто описывать в программе. В качестве шага программы задаются значения параметров целевого положения звеньев, а управление перемещениями звеньев осуществляется так, чтобы звенья достигли своего целевого положения одновременно. При таком управлении осуществляется прямолинейное перемещение между заданными точками. У робота модели 7565 фирмы ИБМ звенья *X*, *Y*, *Z* являются декартовыми, и программирование перемещений часто осуществляется на уровне звеньев.

В приведенном ниже примере покоординатное перемещение заданных звеньев к указанным положениям в мировых координатах осуществляется с помощью вызовов процедуры *MOVE*. При задании абсолютных перемещений считается, что исходное положение звена находится точно посередине его диапазона физических перемещений.

```
MOVE(JZ, 3, 0);
MOVE(<JR, JP, JW>, <—45.0, 0.0, 0.0>);
MOVE(<JX, JY>, <5.0, 8.5>);
MOVE(JG, 3.0);
MOVE(JZ, —1.5);
MOVE(JG, 1.5);
MOVE(ARM, 0.0);
```

JX, *JY* и *JZ* — соответственно идентификаторы звеньев *X*, *Y* и *Z*; *JR*, *JP* и *JW* — идентификаторы звеньев запястья, определяющие соответственно его крен, рыскание и тангаж; *JG* — идентификатор захвата; идентификатор *ARM* используется для ссылки на все звенья манипулятора.

Программа имеет возможность задавать величину ускорения, торможения, предельной скорости и периода успокоения. Например, в результате вызова

```
MOVE(ARM, P,, <0.5, 1.0, 1.0,0>);
```

будет осуществлено перемещение манипулятора в положение, заданное переменной *P*, с предельной скоростью, равной половине максимальной, с максимальной величиной ускорения и торможения и без периода успокоения (система переходит к отработке следующего перемещения, не дожидаясь успокоения манипулятора).

Системная процедура *AMOVE* обеспечивает выполнение программы одновременно с перемещением. В следующем примере:

```
AMOVE(ARM, P)
  .
  .  (параллельные вычисления)
  .
WAITMOVE;
```

вычисления и перемещения осуществляются одновременно. Синхронизация этих процессов осуществляется с помощью процедуры *WAITMOVE*.

Перемещения в декартовых координатах. Если система координат робота отлична от декартовой, то задавать перемещение в координатах звеньев очень неудобно. Однако при работе с такими роботами пользователя больше интересует не положение отдельных звеньев, а положение центра рабочего органа манипулятора. В этих случаях приходится пользоваться заданием перемещений в декартовых координатах.

При управлении перемещением в декартовых координатах программист задает положение центра рабочего органа манипулятора в формате его координат и ориентации в пространстве, независимо от положения отдельных звеньев. С положением и ориентацией центра рабочего органа можно связать декартовую систему координат или координатную сетку. В АМЛ положения связанных систем координат задаются преобразованиями центра мировой системы координат. Используются следующие три типа преобразований.

Преобразование матрицы поворота. Преобразование матрицы поворота определяется трехмерным вектором действительных чисел, задающим смещение относительно начала координат другой системы и матрицей поворота размером 3×3, задающей ориентацию.

Преобразование углов Эйлера. Преобразование углов Эйлера определяется трехмерным вектором действительных чисел, задающим смещение относительно начала координат другой системы и трехмерным вектором, координатами которого являются значения углов Эйлера (направляющих углов), задающих ориентацию.

Преобразование вектора параметров сочленений. Преобразование вектора параметров сочленений определяется вектором управляющих параметров сочленений и трехмерным вектором действительных чисел, задающим смещение центра рабочего органа относительно присоединительного фланца.

Для изменения представления данных имеются системные процедуры; набор системных процедур можно расширить за счет пользовательских процедур, реализующих перемещения в декартовом пространстве. Например, следующая процедура

```
FMOVE: SUBR(TRANS, COORD DEFAULT
             <0., 0., 0.>, TTOFFSET DEFA-
             ULT <0., 0., 0.>, CTLSET);
GOALSET:     NEW  TRANSBOX(TRANS,
             ARM, QGOAL(ARM), TTOFF-
             SET COORD);
MOVE(ARM, GOALSET,, CTLSET);
END;
```

выполняет перемещение рабочего органа в точку *COORD* в заданной системе координат *TRANS*. Третий параметр процедуры представляет собой расстояние от центра рабочего органа до запястья, а четвертый параметр задает характеристики перемещения (скорость, ускорение, торможение, время успокоения).

Сглаживание траектории. Если требуется выполнить последовательность перемещений манипулятора, то его движение будет прерывистым, так как манипулятор останавливается при достижении каждого целевого положения. Таких остановок можно избежать, используя систему контурного управления перемещением, при котором остановка происходит только при достижении конечной точки. Через промежуточные точки робот проходит с наибольшими возможной точностью и скоростью.

Точное перемещение. В производстве к роботу часто предъявляются требования по соблюдению заданной величины допуска. К сожалению, современные промышленные роботы не всегда обеспечивают желаемую точность и точность повторного позиционирования. Это объясняется несколькими причинами: возможны изменения механических параметров и структуры манипулятора и инструмента; сказывается влияние смещения робота и оснастки; на положение рабочего органа оказывает влияние температурный режим; происходит постепенный износ частей робота; сказывается разброс размеров объектов, с которыми работает робот.

От влияния большинства перечисленных причин можно избавиться, выполнив процедуру калибрования. Калибрование заключается в периодическом приведении мани-

пулятора в заданные опорные положения в рабочем пространстве, относнтельно которых все другие положення определяются в терминах смещенний или преобразования координат. Калибрование осуществляется с помощью систем очувствления (см. ниже). Конечные точки перемещений описываются в терминах малых смещений или преобразования координат от опорного положения. Поскольку изменения в рабочем пространстве практически не влияют на велнчины малых отклонений, во время периодических калибрований их корректировка не производится. Процедура калибрования выполняется по некоторому расписанию или при обнаружении рассогласований. В любых случаях калибрование можно выполнить автоматически, с минимальным простоем оборудования. Калибрование можно также выполнять в рабочем режиме с использованием подсистем очувствления в процессе выполнения задания.

В АМЛ имеется несколько процедур, которые используются для установки в базовое положение, относительно которого измеряются смещения. Процедура *FINDPOST*, использующая в своей работе светодиод на пальцах захвата, определяет его положение относительно штифта. Процедура *FINDEDGE*, использующая в своей работе светодиод, определяет положение манипулятора относительно непрозрачного предмета. Процедура *CGRASP* выполняет центрирование положения захвата и захватывание предмета, заранее неизвестных размеров, находящегося между пальцами захвата. Кроме того, в АМЛ имеются две процедуры вычисления погрешности позиционирования вращательного звена: *CALROLL* — для звена, выполняющего вращение рабочего органа, и *CALYP* — для звеньев тангажа и рыскания.

21.2.3. Подсистемы очувствления

Для реализации точного перемещения в языке программирования робота должны быть средства для работы с подсистемами очувствления, поскольку при периодических калиброваниях требуется фиксировать совмещение манипулятора с опорными положениями в рабочем пространстве. Такое опорное положение может быть задано, например, с помощью закрепленного штифта. В процессе совмещения с опорным положением используются светодиоды, силомоментные и дальномерные датчики.

Этн датчики могут использоваться не только для устранения погрешностей, но и в общем случае, когда положение детали является величиной переменной, например, при вставлении стержня в гнездо. При вставленин стержня в гнездо для определения направления следующего перемещения управляющая программа использует информацию, полученную от силомоментных датчиков. Другой простой пример — захватыванне деталн неизвестного размера. Программа управляет закрытием захвата до тех пор, пока не будет зарегистрировано действующее на палец усилие. Затем производится центровка захвата относительно объекта с использованием снловой обратной связи в цепи управления другого пальца и сжимание пальцев с заданным усилием.

Датчики пользователя. В соответствии со спецификой задания пользователи робототехнических систем обычно вводят в рабочее пространство специально разработанные датчики. К таким датчикам относятся: предохранители, вызывающие программное прерыванне при входе оператора в «опасную зону»; кнопки управления на пульте оператора; питатели, вызывающие программное прерывание по окончании запаса деталей или в случае поломки; инструменты и оснастка, структуры, приводимые в действие по команде; контрольные датчики (например, оборудование, измеряющее допуски деталей); управляемые микроЭВМ измерительные приборы.

Обмен информацией между управляющей программой и датчиками может осуществляться либо синхронно, либо асинхронно. Синхронный обмен информацией с датчиками осуществляется как последовательный шаг программы. Асинхронный обмен информацией управляется событием.

В АМЛ обеспечивается связь с датчиками, установленными на пальцах захвата, вырабатывающими сигналы силомоментного очувствления. Светодиод, расположенный между пальцами захвата, выполняет ограниченные функции СТЗ (регистрацию наличия объекта).

Датчики пользователя можно описать с помощью системной процедуры *DEFIO*. Они рассматриваются как цифровые устройства ввода или вывода. Информация от датчиков может использоваться для управления перемещением (перемещение может прекратиться в случае срабатывания датчика). Такой подход соответствует концепции защищенных перемещений рабочего органа вблизи объекта. В следующем примере

$$M = MONITOR(LED, 3, 0, 0);$$
$$MOVE(ARM, P, M);$$

светодиод используется в таком режиме, что при наличии объекта между пальцами захвата датчик срабатывает. Движение манипулятора прекращается либо при достижении целевого положения *P*, либо при срабатывании датчика *M*.

Системную процедуру *MONITOR* можно также использовать для задания процедуры, выполняющейся асинхронно при срабатывании датчика. Например,

$$FDRMON = MONITOR(EMPTY, 1, 0, 0, 1.0, 'FILLFEEDER');$$

процедура *FILLFEEDER* будет вызвана при срабатывании пользовательского датчика *EMPTY*. Синхронное использование датчиков обеспечивается системной процедурой *SENSIO*, которая выполняет цифровой обмен информацией с датчиками.

21.2.4. Использование системы технического зрения

Системы технического зрения (СТЗ) предоставляют более широкие возможности очувствления, чем стандартные силомоментные датчики. Ниже перечислены основные области применения промышленных СТЗ. В версии языка АМЛ модели 7565 работа с СТЗ не предусмотрена, но в разрабатываемых версиях языка АМЛ она будет возможна (более подробно см. [10]).

Фиксация присутствия. Фиксация присутствия — процедура определения, находится ли объект в заданном месте. В большинстве случаев для этого достаточно использовать обычный светодиод.

Подсчет объектов. Подсчет требует вычленения отдельных объектов по данному изображению.

Контроль и измерение. Контроль и измерение заключается в обследовании объектов по их изображению на предмет соответствия заданным характеристикам.

Определение параметров положения объекта. Объекты должны располагаться таким образом, чтобы их можно было захватить манипулятором или соединить с другими объектами. Определение параметров положения объектов в настоящее время является важнейшей функцией СТЗ. В отсутствии СТЗ необходимо использование фиксирующих устройств или питателей.

Распознавание. Распознавание позволяет классифицировать объекты и обрабатывать их в соответствии с их типами. Примером может служить операция распознавания клавиш клавиатуры дисплея. Если управляющая программа манипулятора предписывает захватить клавишу, помеченную буквой *R*, то в случае появления в поле зрения клавиши, помеченной буквой *S*, возникнет состояние ошибки. Другой пример — сортировка и раскладка деталей по соответствующим ячейкам.

21.2.5. Связь

Ввиду универсальности и наличия интеллекта роботы нельзя рассматривать как автономное устройство. Промышленный робот должен взаимодействовать с операторами и элементами технологической среды. В языке АМЛ имеются лингвистические средства связи с оператором, с другим роботом и с другой ЭВМ. Эти функции рассматриваются ниже.

Взаимодействие с оператором. Традиционное представление об операторе автоматизированного оборудования предполагает наличие у него среднего образования и иногда небольших познаний в области вычислительной техники. Однако в большинстве случаев от оператора требуется понимание программы, написанной на языке программирования робота. Для организации интерактивного взаимодействия обычно используются следующие приемы и средства.

Меню. При выводе на дисплей меню различных функций оператор получает возможность выбора решения из нескольких вариантов. Работа с экраном и формирование меню поддерживается средствами АМЛ.

Запрос/ответ. Во многих случаях бывает достаточно ответить на запрос в форме «да-нет». С помощью системных процедур языка АМЛ — *DISPLAY* и *READ* — диалог с оператором поддерживается на более низком уровне. Наряду с процедурой *READ* можно использовать системную процедуру *PREFILL* для формирования ответа на запрос по умолчанию. В случае необходимости оператор может изменить этот ответ.

Программируемые функциональные клавиши. С помощью программируемых функциональных клавиш оператор может прерывать выполнение программы для выполнения каких-либо действий. В АМЛ имеется системная процедура, с помощью которой описываются действия, выполняемые при нажатии функциональной клавиши.

Клавиши и индикаторы на пульте-приставке. Если пульт-приставка используется в качестве обучающего устройства, то он может иметь дополнительные клавиши и индикаторы для задания специфических действий. В системе 7565 пульт-приставка оснащен 10-символьным дисплеем. В АМЛ имеются системные процедуры, обеспечивающие доступ к этому дисплею.

Цифровые устройства пользователя. Пользователи могут разрабатывать собственные нестандартные устройства связи — пульты и дисплеи. Системные процедуры языка АМЛ обеспечивают доступ к кнопочным пультам, светодиодным индикаторам и цифровым устройствам пользователя.

Обработка ошибок. Эффективным способом, избавляющим оператора от поиска некорректных мест в программе, является режим обработки возникающих ошибок прикладной программой. Если ошибка не имеет фатального характера, то возможно ее автоматическое исправление, в противном случае оператору могут быть выданы на дисплей варианты действий (в виде меню или запросов) или совет обратиться к программисту. Для обработки ошибок в АМЛ имеется системная процедура *ERRTRAP*. Ниже приведен текст процедуры обработки, возникающей при выполнении операции деления с плавающей точкой ошибки по потере точности, в результате работы которой в программу возвращается значение результата 0.0.

```
COMPUTE: SUBR(A, B, C, D);
——ФУНКЦИЯ: ДЛЯ ЛЮБОГО ЭЛЕ-
  МЕНТА АГРЕГАТОВ
——A, B, C, D ПРОИЗВОДИТСЯ ВЫ-
  ЧИСЛЕНИЕ
——(A*B)/(C*D) И ПЕЧАТАЕТСЯ РЕ-
  ЗУЛЬТАТ
I: NEW 0;
N: NEW AGGSIZEA(A);
RESULT: NEW REAL;
TRAP: SUBR(ERRNUM, ERRDATA);
——ЕСЛИ ДЕЛЕНИЕ НА НОЛЬ, ТО
  РЕЗУЛЬТАТ РАВЕН 0. 0
——И ВЫПОЛНЕНИЕ ПРОДОЛЖАЕТСЯ
IF ERRNUM EQ 3055 THEN BEGIN;
   RESULT=0.0; QUIT(SUBRLEVEL-1);
   END
——В ПРОТИВНОМ СЛУЧАЕ ОШИБКИ
  НЕТ
   ELSE RETURN(PARMS);
   END;
ERRTRAP('TRAP');
WHILE(I = I + 1) LE N DO BEGIN;
   RESULT=(A(I)*B(I))/(C(I)*D(I));
   DISPLAY(RESULT, EQL);
   END;
END;
```

Связь с центральной ЭВМ и другими роботами. Задачи управления производством (планирование, учет, управление производством, снабжение) обычно решаются не на управляющей ЭВМ робототехнической системы, а на других ЭВМ. Однако робот должен обмениваться данными с этими ЭВМ, получать от них команды и посылать накопленную статистическую информацию (для последующего использования в решении задач планирования). Наличие связи устройства управления роботом с более мощной ЭВМ позволяет разрабатывать на ней робототехнические программы, а затем загружать их в устройство управления робота для проверки и выполнения.

Если в составе роботизированной ячейки имеется несколько взаимодействующих роботов, то они должны обмениваться данными и синхронизировать свои действия (аналогично заданиям в мультипрограммной вычислительной системе). Как правило, роботы обслуживаются не общими, а индивидуальными ЭВМ, а для синхронизации используются каналы связи. В системе 7565 связь с другими роботами и удаленной ЭВМ обеспечивается с помощью системной процедуры *TP3780*. *TP3780* является процедурой пакетной передачи информации, которая осуществляет чтение из файлов и запись информации в файлы удаленной вычислительной системы. В этой системе должны иметься средства поддержки удаленного ввода заданий (УВЗ) в формате, используемом в абонентской станции 3780. Например, в результате обращения к процедуре

TP3780(*'CTLFILE'*, *'DATFLE'* ,,, 0);

удаленной вычислительной системе будут посланы командный файл *CTLFILE* и информационный файл *DATFLE*. В командном файле содержится управляющая информация по использованию файла данных.

21.2.6. Обработка данных

Выше было упомянуто, что робототехнические языки программирования должны иметь средства задания перемещений, обработки сенсорных данных, взаимодействия с СТЗ и организации связи. Средства обработки данных используются для реализации всех перечисленных функций. Ниже подробно рассматриваются основные лингвистические средства обработки данных.

Типы данных. В робототехнических языках программирования должны быть определены все типы данных, необходимые для решения прикладных задач: действительные числа (для задания параметров положения отдельных звеньев); массивы (для агрегатирования данных при хранении сводных данных о параметрах положения всех звеньев); символьные строки (для ссылок на системные ресурсы, например, файлы); целые числа (для ссылок на прочие системные ресурсы, например, звенья манипулятора).

Для хранения данных в АМЛ используются переменные. Переменные могут быть статическими, динамическими или глобальными. Память под статические переменные отводится при первом вызове процедуры, в которой они описаны, и их значение всегда равно результату последнего присваивания. Динамические переменные распределяются всякий раз при вызове процедуры, в которой они описаны. Глобальные переменные описываются вне данной процедуры.

Приведем два примера определения переменных:

I: *STATIC INT*;
P: *NEW QGOAL*(*ARM*);

Начальное значение переменной задается некоторым выражением, записываемым вслед за ключевыми словами *STATIC* или *NEW* (*NEW* означает, что переменная динамическая). В первом примере переменной присваивается целое значение ноль, а во втором примере описан вектор параметров текущего положения манипулятора.

В АМЛ используется динамическое объявление имен. В процессе выполнения программы используется значение имени, соответствующее последнему встретившемуся объявлению (подобно вложенным конструкциям в большинстве языков программирования). В АМЛ поддерживаются следующие типы данных: целые, действительные, строчные, указатели и агрегаты.

Агрегат представляет собой логически объединенную совокупность переменных (в их числе могут быть и агрегаты). Агрегаты могут быть неоднородными (включающие в себя переменные различных типов). Агрегаты в АМЛ используются, в частности, для определения массивов, векторов, матриц вращения и положения манипулятора. Агрегат, в который не входит ни одной переменной, называется пустым и обозначается ⟨⟩. Ниже приводятся примеры задания агрегатов:

⟨1, *'HELLO'*, 46.7⟩
⟨⟨1, 2, 3⟩, ⟨4.5.6⟩⟩

Операции. Для вычисления параметров положения звеньев в АМЛ могут использоваться стандартные арифметические операции (сложение, вычитание, умножение, деление). Они определены над различными типами данных. В процессе разработки программы для робототехнической системы требуется выполнение и других операций. Например, для преобразования параметров положения из систем координат сочленений в декартовую систему координат используются тригонометрические функции, для принятия решений на базе сенсорных данных используются операции сравнения, для обработки данных от двоичных датчиков пользователя применяются логические поразрядные операции.

В АМЛ определены следующие операции над данными.

Индексирование агрегатов. Операция индексирования агрегатов имеет такой же синтаксис, как и вызов процедур, но вместо вызова процедуры производится выбор указанного индексом значения внутри агрегата. В следующем примере

```
ARRAY: NEW M OF N OF REAL;—МАТ-
                     РИЦА M×N
       .
       .
       .
ARRAY(I, J) = 0.0;—ЭЛЕМЕНТ(I, J) РА-
                     ВЕН НУЛЮ
ARRAY(I) = 0,0;—СТРОКА  I  РАВНА
                     НУЛЮ
ARRAY(IOTA(M), J);—СТОЛБЕЦ J РА-
                     ВЕН НУЛЮ
```

в последнем операторе производится индексирование сразу нескольких значений внутри агрегата. (Системная процедура *IOTA* создает агрегат вида ⟨1, 2, ..., *M*⟩.)

Присваивание. В результате операции присваивания переменной присваивается значение некоторого выражения.

Арифметические операции (+, —, *, /, ***IDIV***). Это стандартные арифметические операции. Оператор / означает деление вещественных чисел, оператор *IDIV* используется для целочисленного деления.

Операции отношения (*FQ*, *NE*, *GE*, *GT*, *LE*, *LT*). В результате выполнения операций отношения над выражениями вырабатывается их значение «истина» или «ложь», которые выражаются целыми числами 1 и 0 соответственно для того, чтобы значения отношений можно было использовать в последующих арифметических операциях.

Логические операции (*AND*, *OR*, *NOT*, *XOR*). Логические операции используются для выполнения поразрядных действий над целыми операндами. В АМЛ используется представление целых чисел в виде дополнения до двух.

Тригонометрические функции. Для вычисления тригонометрических функций в АМЛ используются системные процедуры *SIN*, *COS*, *TAN*, *ASIN*, *ACOS* и *ATAN*.

Векторные функции. Для выполнения векторных операций используются системные процедуры *CROSS*, *DOT* и *MAG*.

Матричные функции. Для выполнения операций над матрицами используются системные процедуры *DOT*, *INVERSE* и *TRANSPOSE*.

Внешняя память. Для ввода/вывода информации в АМЛ широко используются внешние файлы.

Хранение программ. В результате изменения содержимого оперативной памяти возникает необходимость постоянного хранения робототехнических программ во внешней памяти.

Хранение групп заданий. Возможно совмещение описаний операций, выполняемых над различными объектами, если их части,

зависящие от специфики объекта, хранить в отдельной базе данных. Эту базу данных можно хранить в удаленной вычислительной системе (см. разд. 21.2.5). Выбирая из базы данных различную информацию, можно по одному описанию строить различные управляющие параметры робота.

Сбор статистической информации. В системе выполняется сбор статистической информации (как в общем, так и раздельно по типам объектов) и выдача ее по запросу в локальную сеть связи предприятия. Далее она может использоваться в процессе планирования производства. Эту информацию необходимо хранить во внешней памяти, чтобы избежать потери информации, например, при аварийном отключении напряжения.

Выдача сообщений. С целью экономии оперативной памяти, сообщения оператору можно хранить во внешней памяти. При этом для ускорения выдачи сообщений целесообразна организация доступа к этим файлам.

Генерация отчетов. Средствами АМЛ обеспечивается генерация отчетов о деятельности рабочих станций и хранение их во внешнем файле для последующей выдачи на печать и справок.

В АМЛ используются стандартные методы организации файлов на гибких и жестких дисках. Для реализации прямого доступа к записям фиксированной длины до 256 байт используются системные процедуры.

Работа в реальном времени. Робототехнические программы выполняются в реальном времени, и поэтому часто требуется точная временная синхронизация. Осуществление операций ввода/вывода в реальном времени и синхронизация выполнения программы обеспечиваются наличием внутренних часов и интервальных таймеров.

21.2.7. Управление памятью

Ниже будет показано, что робототехнические программы могут быть довольно сложными. Зачастую информационное и программное обеспечение сложных робототехнических заданий требует большого объема оперативной памяти. Если этой памяти недостаточно, то необходимо использовать средства управления памятью. Один из способов решения этой задачи заключается в использовании страничной организации памяти, но это может привести к ухудшению временных характеристик при работе в реальном масштабе времени. Во избежание этого в АМЛ включены пользовательские средства управления памятью.

Диспетчеризация памяти. В АМЛ используются системные процедуры для устранения фрагментации памяти. В результате свободная память может распределяться большими участками.

Оверлейные структуры. В оверлейных структурах загрузка программ в оперативную память и передача им управления производятся лишь когда это необходимо. После выполнения такой программы, занимаемая ею память освобождается. В АМЛ можно использовать оверлейные структуры.

Динамическое распределение и освобождение памяти. Используемая программой память может распределяться и освобождаться динамически по мере необходимости. Таким образом, снижаются потребность в памяти и ее потери по сравнению со статическим распределением. В АМЛ имеются две процедуры: одна для выделения программе оперативной памяти заданного объема, а другая — для освобождения оперативной памяти заданного объема.

21.2.8. Разработка программ

В некоторых языках программирования используются кроссовые средства разработки программ (например, имеющиеся в составе операционной системы или другой ЭВМ). Особенно это характерно для компилируемых языков. Если кроссовые средства недоступны (например, в случае автономной робототехнической системы), то средства разработки программ должны быть включены в состав языка программирования. Для формирования и корректировки файла с текстом программы используются средства редактирования текста. После завершения редактирования файл загружается в оперативную память для выполнения. При необходимости программист может повторно вызвать редактора текстов для корректировки программы и затем заново загрузить программу в оперативную память.

В некоторых системах можно работать с текстом программы непосредственно в оперативной памяти. Готовая программа записывается во внешний файл и загружается в память в начале следующего сеанса работы. Этот способ разработки программы предоставляет пользователю более мощные средства взаимодействия с выполняемой программой. Редактирование в памяти (или «горячее» редактирование) ниже рассматривается более подробно.

В АМЛ имеются как средства редактирования во внешнем файле, так и в памяти, причем по интерфейсу пользователя они неотличимы. Для выдачи команд редактору используется дисплей. Синтаксис команд простой, он не совпадает с синтаксисом

команд АМЛ. Благодаря использованию такого интерфейса можно не только редактировать тексты программ на АМЛ, но и выполнять многие стандартные действия. Кроме того, к командам редактирования можно обращаться непосредственно из текста программы на АМЛ, используя синтаксис языка. Это позволяет, во-первых, программировать функциональные клавиши для выполнения функций редактирования, во-вторых, составлять процедуры для выполнения сложных функций редактирования и, в-третьих, создавать пользовательские команды редактирования. К командам языка АМЛ можно обращаться в процессе редактирования, что позволяет проверять программу в процессе разработки и определять контрольные точки. Редактирование программы в оперативной памяти сопряжено с некоторыми ограничениями, при этом разрешен возврат в любую точку активной программы.

21.2.9. Отладка

Отладка робототехнической программы представляет собой сложный процесс. В некоторых случаях на отладку затрачивается в несколько раз больше времени, чем на составление программы. Поэтому в составе робототехнической системы необходимы мощные отладочные средства. Если в операционной системе таких средств нет, то программист не имеет возможности отлаживать программу в том виде, как он ее написал, и вынужден работать с ней в машинных кодах или на языке ассемблера. По этой причине в большинстве робототехнических языков программирования включены лингвистические средства отладки. Ниже приводятся примеры отладочных функций.

Пошаговое выполнение. Остановки после выполнения заданного количества операторов программы дают возможность программисту выполнять пошаговую отладку.

При выполнении программы в режиме трассировки каждый выполняемый оператор выводится на печать.

Останов по адресу. Если в программе задана точка останова, то при прохождении этого места в процессе выполнения программы возникает прерывание.

Редактирование в оперативной памяти. При прерывании программы по одной из предыдущих отладочных функций или при обнаружении ошибки системой выполнение программы приостанавливается и управление передается средствам отладки. Отладочная среда дает программисту возможность определить причину прерывания (или ошибки, если она имеется). При редактировании в оперативной памяти программист может проанализировать текущие значения переменных и в случае необходимости изменить их. С целью корректировки текста приостановленной программы можно производить вставку, удаление или модификацию операторов. После внесения изменений в текст программы во внешнем файле потребуются повторная загрузка программы и рестарт. Кроме того, необходимо программно восстановить состояние зажимов и питателей, а также разобрать частично собранные в процессе выполнения узлы. Если фрагмент программы соответствует выполнению операции сварки или склеивания, разборка готового узла весьма нежелательна. Редактирование в оперативной памяти, давая возможность вносить изменения в приостановленную программу, позволяет проверять и отлаживать ее, не выполняя дорогостоящих рестартов.

21.3. Пример использования АМЛ

Ниже приведен пример описания задания на языке АМЛ. Приводится текст программы. На рис. 21.3 изображен собираемый узел (амортизатора) и приведен порядок сборки деталей. Процесс решения задачи включает в себя следующие основные шаги: составление плана рабочей зоны, выбор ключевых точек, составление программы, определение точек, проверка программы.

21.3.1. Составление плана рабочей зоны

На первом шаге разработки задания следует построить схему рабочей зоны, определив оптимальное расположение питателей и зажимов. На рис. 21.4 представлен вариант схемы рабочей зоны сборки амортизаторов. При сборке устанавливаются следующие детали: колпачки, пружины, болты,

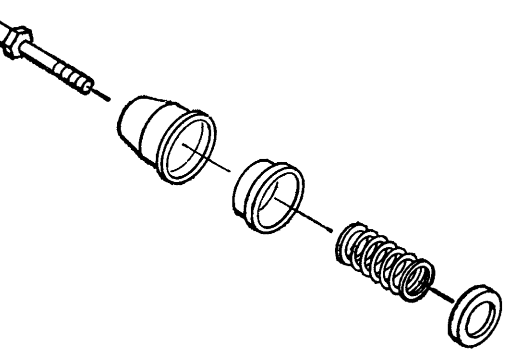


Рис. 21.3. Детали амортизатора и порядок их сборки

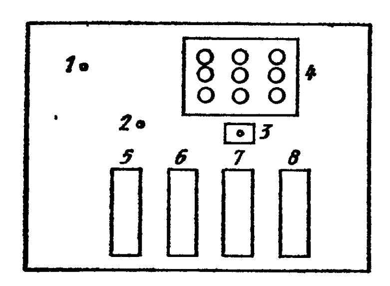


Рис. 21.4. Схема рабочей зоны сборки амортизатора:

1 — исходное положение; *2* — точка калибрования; *3* — зажим; *4* — палета для узлов; *5* — колпачки; *6* — пружины; *7* — башмаки; *8* — чашки

чашки и резиновые башмаки. На рис. 21.5 приведен внешний вид рабочей области.

Процесс сборки амортизатора состоит из следующих операций: взять болт с палеты и установить его в зажим, надеть башмак на болт, надеть чашку на болт, надеть пружину на болт, надеть колпачок на болт, положить собранный узел на палету.

21.3.2. Выбор ключевых точек

На следующем этапе разработки точкам на схеме присваиваются имена. Под точкой понимается место в рабочей зоне, где производится захватывание или освобождение детали или выполнение некоторой операции. Можно также присвоить имя положению в пространстве над деталью, куда требуется подвести захват. При позиционировании захвата над деталью операции подхода и отхода от детали выполнять проще. Для сборки амортизатора выбраны следующие точки: *Post* 1 (положение 1) — точка калибрования, *Safept* (исходное положение), *Overbolt* (над болтом), *Overhole* (над отверстием), *Overboot* (над башмаком, массив), *Overcup* (над чашкой), *Overspr* (над пружиной), *Overcap* (над колпачком). На рис. 21.6 изображены положения, соответствующие этим точкам. Точка *Post* 1 должна быть откалибрована, потому что положение всех остальных точек определяется по отношению к ней. Калибровка этой точки выполняется периодически во время выполнения программы с помощью процедуры *FINDPOST* языка АМЛ. Калибровка остальных точек не производится, поскольку их координаты хранятся в виде смещений от откалиброванного положения.

21.3.3. Составление программы

На следующем этапе разработки задания необходимо написать программу на языке АМЛ, управляющую процессом сборки, используя выбранные имена точек. Для составления программы можно использовать встроенный в АМЛ редактор. Задача упрощается тем, что многие вспомогательные процедуры уже имеются и задачу можно описывать на более высоком уровне, чем если бы использовался непосредственно язык АМЛ. Примером пакета процедур высокого уровня, предназначенных для обслуживания датчиков и перемещений, может служить программный продукт фирмы ИБМ, который называется «Программирование роботов на примерах» (*PRBE*).

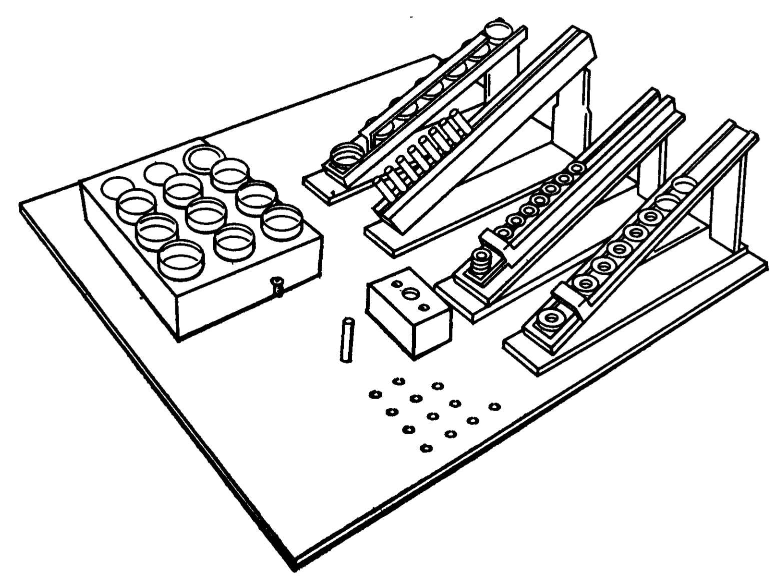


Рис. 21.5. Внешний вид рабочей зоны сборки амортизатора

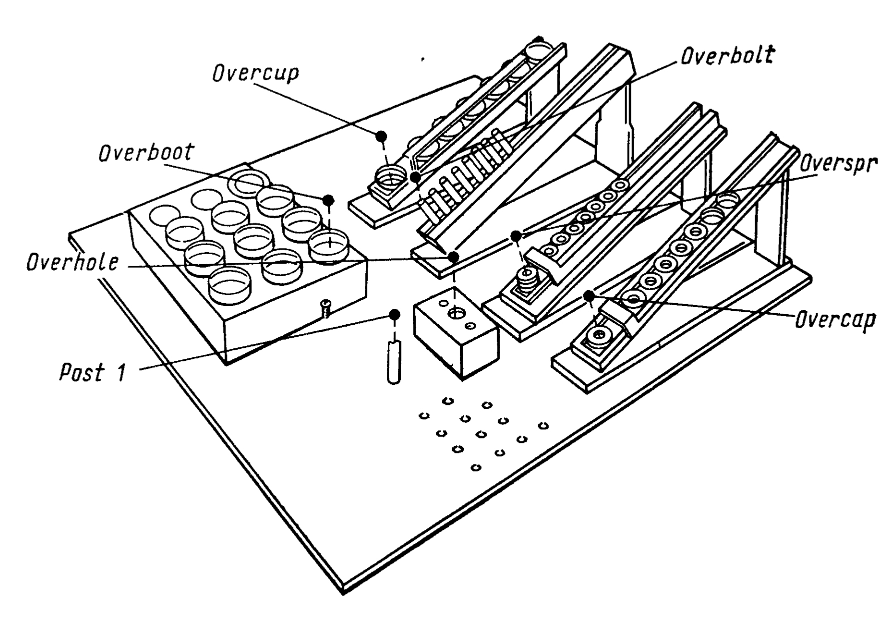


Рис. 21.6. Положение точек в рабочей зоне

На данном этапе значения параметров положения точек не имеют значения. Им могут быть присвоены пока «пустые» значения (например, 0, 0). Ниже приводится текст программы.

21.3.4. Определение точек

После того как программа написана, следует определить положение точек. Решать эту задачу можно несколькими способами. Наиболее простой состоит в следующем.

Вызвать с терминала процедуру *GUIDE*, приводящую пульт-приставку в активное состояние, и с помощью последнего установить манипулятор над точкой калибрования.

Вызвать процедуру *FINDPOST* для точной установки манипулятора над точкой и запоминания параметров его положения.

Для всех остальных точек вызвать процедуру *GUIDE* и выполнить позиционирование манипулятора в соответствующие положения. Вычесть из значения параметров положения каждой точки значения параметров положения откалиброванной точки и запомнить результаты.

Заменить пустые значения параметров положения точек на запомненные значения.

Это не автоматический способ определения точек, и довольно утомительная процедура для программиста. На практике программисты часто пишут специальные процедуры, в которых содержатся вызов системной процедуры *GUIDE* и автоматическая передача параметров положения в

```
AMLSHOCK: SUBR(CALIBRATE DEFAULT TRUE,TOPSEED,ITERATIONS);
--
-- FROM PROGRAM: AMLSHOCK VOLUME: RCP002
-- ****************************************
--
-- *****            PARAMETERS        *****
--
-- ****************************************

TOPSPEED: NEW IF ?TOPSEED     THEN IF     ?TOPSPEED  GT 2 THEN .2
                                   ELSE IF TOPSPEED  GT 1 THEN .2
                                   ELSE IF TOPSPEED  LE 0 THEN .2
                                   ELSE    TOPSPEED  ELSE .2;
```

```
ITERATIONS: NEW IF ?ITERATIONS THEN IF       ?ITERATIONS GT 2 THEN 1
                                        ELSE IF ITERATIONS GT 99 THEN 1
                                        ELSE IF ITERATIONS LE 0 THEN 1
                                        ELSE    ITERATIONS FLSE        1;
--------------------------- TRFPOST ---------------------------
TRFPOST: SUBR(PN);   --  POSTNAME. -RETURNS: POINT-VALUE
                PNT: NEW 7 OF 0.0;              --  RETURN POSITION.
                SP: NEW SPEED(.2);              --  SET & SAVE SPEED.
   CLEANUP($UND);
       UND: SUBR;
           SPEED(SP);
           END;
   DISPLAY(EOL,STRING(32),'***FINDPOST***',EOL,STRING(9),
       'USE THE PENDANT TO POSITION THE ARM OVER THE POST: ',PN,'.',
       EOL,STRING(12),
       'THE FINGERS SHOULD BE OPEN AND HANG STRAIGHT DOWN SUCH',EOL,
       STRING(12),'THAT THE "LED" BEAM IS BLOCKED BY THE POST.',
       EOL,EOL,STRING(9),'PRESS THE "END" BUTTON WHEN READY.',
       EOL);
RTY:
   PRINT(2,<'ENABLED',EOL>);
   PNT(<JX,JY,JZ>)=GUIDE(ARM)(<JX,JY,JZ>);
   PRINT(2,<'',EOL>);
   IF ?JG EQ 0 THEN RETURN(PNT);-- NO GRIPPER, NO FINDPOST
                                --  GUIDE WILL HAVE TO SUFFICE
--
   IF ?JR THEN                        -- IF JR AND JG THEN ALL ROTARIES
      MOVE(<JR,JP,JW,JG>,<45,0,90,2.5>) -- ALIGN GRIPPER TO Y.
      ELSE MOVE(<JW,JG>,<135,2.5>); -- ELSE JW DOES JG ALIGNMENT
   IF SENSIO(LED,0) EQ 0 THEN              -- IF LED IS ON, (CTR ON POST)
        CTRMOVE(JX);                         -- FIND & MOVE TO X-CENTER.
--
   SEARCH(JZ,2);               -- SEARCH FOR TOP EDGE OF POST.
   DMOVE(JZ,-.5);              -- DOWN OVER POST.
--
   DMOVE(JX,1);                -- MOVE TO +X-SIDE.
   CTRMOVE(JX);                -- FIND & MOVE TO X-CENTER.
--
   DMOVE(JW,-90);              -- ALIGN WITH X-AXIS.
--
   DMOVE(JY,1);                -- MOVE TO +Y-SIDE.
   CTRMOVE(JY);                -- FIND & MOVE TO Y-CENTER.
--
   PNT(JZ) = SEARCH(JZ,2);     -- SEARCH FOR TOP EDGE OF POST.
   RETURN(PNT);                -- REPORT RESULTS.
ERR:
   DISPLAY(EOL,STRING(20),'*****POST NOT FOUND AS EXPECTED. *****',
          EOL,STRING(9),
          'USE THE PENDANT TO POSITION THE ARM OVER THE POST: ',
          PN,'.',EOL);
   BRANCH(RTY);
---------------------------------------------------------------
      CTRMOVE: SUBR(J);
              PNT(J) = SEARCH(J,-2);  -- FIND +EDGE OF POST.
              DMOVE(J,-1);            -- MOVE TO -SIDE.
                                      -- FIND -EDGE OF POST,
                                      -- *AVERAGE, SAVE RESULT,
                                      -- *AND MOVE TO CENTER.
              MOVE(J, PNT(J)=(PNT(J)+SEARCH(J,2))/2);
      END;
---------------------------------------------------------------
      SEARCH: SUBR(J,D);
                 MID: NEW MONITOR(LED,3,0,0); -- MONITOR ID.
            CLEANUP($UND);
                    UND: SUBR;
```



```
                    ENDMONITOR(MID);
                    END;
              DMOVE(J,D,MID,<.01>); -- MAKE MOTION SLOW & MONITOR.
              IF QMONITOR(MID) EQ -1 THEN -- IF WE TRIP,
                 RETURN(QGOAL(J))          -- RTN CURRENT POSITION.
              ELSE BRANCH(ERR);            -- ELSE, GOTO ERROR LABEL.
        END;
END;
----------------------------------------------------------------------
-- ***********************************************
-- *****              BASE POINTS            *****
-- ***********************************************
POST1_:      NEW
<0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.>;
POST1_:      NEW BEGIN
               IF CALIBRATE THEN
                  POST1_(ARM)=TRFPOST('POST1_');
               POST1_
             END;
-- ***********************************************
-- *****                ARRAYS               *****
-- ***********************************************
OVERBOOT_ARRAY: NEW <
<-6.04377,-6.9217,-1.82102,-45.1941,
-1.23076,18.0848,2.5> + POST1_,
    3,1,
<0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.>,
    4,1,
<0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.>
              >;
-- ***********************************************
-- *****      POINTS RELATIVE TO POST1_      *****
-- ***********************************************
SAFEPT_:            NEW
<0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.>
    + POST1_;
OVERBOLT_:          NEW
<0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.>
    + POST1_;
OVERCUP_:           NEW
>0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.>
    + POST1_;
OVERSPR_:           NEW
<0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.>
    + POST1_;
OVERCAP_:           NEW
<0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.>
    + POST1_;
OVERHOLE_:          NEW
<0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.>
    + POST1_;
OVERBOOT_:          NEW
OVERBOOT_ARRAY(1)
  ;
I: NEW INT;                  -- LOOP INDICES
J: NEW INT;
-- ***********************************************
-- *****          MAIN LINE PROGRAM          *****
-- ***********************************************
   DISPLAY(EOP,'USE THE PENDANT TO POSITION THE',
          'ARM TO A SAFE POSITION.',EOL,
          'HIT THE END-BUTTON TO START',
          'PROGRAM: AMLSHOCK EXECUTION.',EOL);
   PRINT(2,<'ENABLED',EOL>); — MESSAGE TO PENDANT
   GUIDE(ARM);
```

```
    PRINT(2,<' ',EOL>);
    SPEED(TOPSPEED);
    WHILE (ITERATIONS = ITERATIONS - 1) GE 0 DO BEGIN
REPEAT BEGIN                                         --START OF OUTER LOOP
 REPEAT BEGIN                                        --START OF INNER LOOP
    REACH(SAFEPT_);
    REACH(OVERBOLT_);
    APPROACH(3.00000);
    GRASP(1500.00);
    WITHDRAW(3.00000);
    POSITION(OVERHOLE_);
    APPROACH(3.00000);
    SETGRIPPER(1.50000);
    WITHDRAW(3.00000);
    REACH(OVERBOOT_);
    APPROACH(3.00000);
    GRASP(1500.00);
    WITHDRAW(3.00000);
    POSITION(OVERHOLE_);
    APPROACH(3.00000);
    SETGRIPPER(1.50000);
    WITHDRAW(3.00000);
    REACH(OVERCUP_);
    APPROACH(3.00000);
    GRASP(1500.00);
    WITHDRAW(3.00000);
    POSITION(OVERHOLE_);
    APPROACH(3.00000);
    SETGRIPPER(1.50000);
    WITHDRAW(3.00000);
    REACH(OVERSPR_);
    APPROACH(3.00000);
    GRASP(1500.00);
    WITHDRAW(3.00000);
    REACH(OVERHOLE_);
    APPROACH(3.00000);
    SETGRIPPER(1.50000);
    WITHDRAW(3.00000);
    REACH(OVERCAP_);
    APPROACH(3.00000);
    GRASP(1500.00);
    WITHDRAW(3.00000);
    REACH(OVERHOLE_);
    APPROACH(3.00000);
    SETGRIPPER(1.50000);
    APPROACH(.500000);
    GRASP(1500.00);
    WITHDRAW(3.00000);
    TRANSPORT(OVERBOOT_);
    APPROACH(3.00000);
    SETGRIPPER(1.50000);
    WITHDRAW(3.00000);
    OVERBOOT=OVERBOOT_ARRAY(1)+I*OVERBOOT_ARRAY(3)
                                             + J*OVERBOOT_ARRAY(5)
    END                                      --END OF INNER LOOP
    UNTIL (J=J+1) EQ OVERBOOT_ARRAY(4);
    J=0
    END                                      --END OF OUTER LOOP
    UNTIL (I=I+1) EQ OVERBOOT_ARRAY(2);
    I=0
    END;                                     --END OF ITERATIONS LOOP
    RETURN;                                  --RETURN TO CALLER
-------------------TROPS--------------------
```



```
--**********************************************************************
--*                          VERB SUBROUTINES                          *
--*                                                                    *
--*  THIS SECTION CONTAINS A COLLECTION OF SERVICE                     *
--*    SUBROUTINES (ONE FOR EACH VERB IN THE BODY OF THE               *
--*    LOOP).                                                          *
--*                                                                    *
--**********************************************************************
--
------------------------------------------------------------------------
 GRASP: SUBR(HOWHARD) ;
                    MID: NEW <INT,INT> ;
        IF ?JG EQ 0 THEN RETURN;          -- NO-OP IF NO GRIPPER
        MID = MONITOR(<SLP,SRP>,3,-50,HOWHARD) ;
        CLEANUP($UND);          -- INSURE ENVIRONMENT RESTORED.
                    UND: SUBR;
                         ENDMONITOR(MID);
                         END;
        MOVE(JG,0,MID,<.08>); -- MAKE MOTION SLOW & MONITOR.
        END;
------------------------------------------------------------------------
 SETGRIPPER: SUBR(INCHESOPEN);   -- 0.0 TO 3.25
             IF ?JG EQ 0 THEN RETURN;  -- NO-OP IF NO GRIPPER
             TRMOVE(JG,INCHESOPEN);
             END;
------------------------------------------------------------------------
 WITHDRAW:    SUBR(DISTANCE);
              WAITMOVE;
              TRMOVE(<JX,JY,JZ>,QGOAL(<JX,JY,JZ>)+DISTANCE*BOXTRANS()(2,3));
              END;
------------------------------------------------------------------------
 APPROACH:    SUBR(DISTANCE);
              WITHDRAW(-DISTANCE);
              END;
------------------------------------------------------------------------
 TRANSPORT:   SUBR(POINTVALUE);
                J: NEW <JX,JY,JZ> ;
              TRMOVE(J,POINTVALUE(J)) ;
              END;
------------------------------------------------------------------------
 POSITION:    SUBR(POINTVALUE);
  J: NEW SELECT(<1,1,1,?JR,?JP,?JW>,<1,2,3,4,5,6>);
       -- J IS ALL JOINTS BUT GRIPPER AVAILABLE ON SYSTEM
        TRMOVE(J,POINTVALUE(J)) ;
        END;
------------------------------------------------------------------------
 REACH:       SUBR(POINTVALUE);
              TRMOVE(ARM,POINTVALUE(ARM));
              END;
------------------------------------------------------------------------
 TRMOVE:      SUBR(JS,GS);
              AMOVE(JS,GS);
              END;
------------------------------------------------------------------------
 SET_SPEED:  SUBR(FRACTION) ;
       SPEED(FRACTION*TOPSPEED);
       END;
END;--AMLSHOCK: SUBR;
```

программу. Программные средства такого типа позволяют значительно сократить время, затрачиваемое на определение точек и отладку. Например, с помощью пакета программ *PRBE* и пульта-приставки можно в диалоговом режиме, используя меню, задать имена точек и определить параметры их положения. При выборе определенных режимов из меню может быть выполнена автоматическая генерация простых программ на АМЛ.

21.3.5. Проверка программ

Как отмечалось выше (разд. 21.2.9), проверка программ требует значительного времени. Это определяется несколькими причинами.

Временные характеристики. Эффективность использования роботов в значительной степени зависит от того, насколько быстро он может выполнить задание. Поэтому программисты обычно стараются улучшить временные характеристики задания.

Точность позиционирования. В процессе отладки робототехнической программы возникает ряд затруднений, связанных с точностью определения параметров положения точек. Некоторые из них можно решить с помощью уточнения параметров положения, другие — замедляя движение манипулятора. Третьи могут потребовать изменения алгоритма и использование сенсорной обратной связи.

Обработка ошибок. Программисту трудно предусмотреть все возможные ошибки, которые могут возникать при выполнении задания на сложном оборудовании (например, при робототехнической сборке). Обычно программисты в процессе отладки дополняют программу блоками обработки непредусмотренных ошибок и учета допусков деталей.

Рассмотренное выше задание достаточно простое и его разработка не вызывает серьезных затруднений. В более сложных случаях возникает необходимость в использовании отладочных средств языка АМЛ.

Если в процессе отладки возникает ситуация, вызывающая прерывание программы, то формируется точка останова. На экране дисплея появляются сообщение об ошибке и запрос команды. Отлаживая программу, программист может проверить содержимое переменных, определить состояние системы или просмотреть текст программы с помощью редактора. Если причина ошибки определена сразу, то программу можно исправить, внеся изменения в ее текст. Редактор языка АМЛ позволяет вносить изменения в приостановленную программу непосредственно в оперативной памяти. Затем программист может возвратить управление программе и продолжить ее выполнение. Если причину ошибки сразу установить невозможно, то в соответствующих местах программы можно установить точки трассировки или остановов и снова передать управление программе.

21.4. Выводы

Первая версия языка АМЛ была реализована в 1978 г. С его помощью было разработано много различных робототехнических заданий. АМЛ представляет высокоэффективное средство структурного программирования, предназначенное для разработки робототехнических заданий, удобное в работе и несложное в изучении. В АМЛ реализовано большинство робототехнических функций структурного программирования. Средства разработки и отладки программ в АМЛ обеспечивают эффективное взаимодействие программиста с заданием. Пока на рынке не появятся системы программирования на уровне задания, основным средством для разработки сложных заданий останется язык программирования общего назначения, расширенный для использования в робототехнике. Примером языка такого типа является АМЛ.

Благодарности. Теоретическая работа над созданием языка АМЛ была начата Гроссманом, Майер, Саммерсом и Тейлором в исследовательском центре фирмы ИБМ в г. Йорктаун. Реализация АМЛ была выполнена группой промышленной автоматизации фирмы ИБМ в г. Бока Ратон, шт. Флорида. Рискуя кого-то забыть, мы хотим высказать свою признательность ведущим специалистам этой группы: во-первых, Гордону, Миллету и ВанДайку, руководившим разработкой программного обеспечения; во-вторых, Тейлору за помощь, которую он нам оказал при внедрении его разработки; и, наконец, Габриелли за неоценимую помощь в работе с интерпретатором языка и Форо, Хейкинену, Хачинсону, Ласдону и Сиску, выполнявшим разработку отдельных блоков системы программного обеспечения. Особая благодарность приносится Долану, предоставившему авторам пример, приведенный в разд. 21.3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *AML Reference Manual*, IBM Manual SC34—0410.
2. Bonner, Susan and Shin, Kang G., A Comparative Study of Robot Languages, *IEEE Computer*, December 1982, pp. 82—95.
3. Buckley, S. J., An Experimental Interactive Editor, IBM technical report TR54.216.
4. *IBM Robot System/1 General Information Manual and User's Guide*, IBM Manual GA34—0180.
5. *IBM 7535 Manufacturing System User's Guide*, IBM Manual 8508963.
6. *IBM 7565 Manufacturing System Program Robotics by Example (PRBE) User's Guide*, IBM Manual 8509021.
7. *IBM 7565 Manufacturing System AML Reference*, *IBM* Manual 8509015.
8. *IBM 7565 Manufacturing System AML Screen Editor*, IBM Manual 8509016.
9. *IBM 7565 Manufacturing System General Information*, IBM Manual 8508982.
10. Lavin, M. A. and Lieberman, L. I., AML/V: An Industrial Machine Vision Programming System, *The International Journal of Robotic Research*, Vol. 1, No. 3, Fall 1982.
11. Meyer, J. M., Summers, P. D., and Taylor, R. H., AML: A Manufacturing Language, *The International Journal of Robotic Research*, Vol. 1, No. 3, Fall 1982.

Т. Лоцано-Перес, Массачусетский технологический институт, г. Кембридж, шт. Массачусетс,
Р. А. Брукс, Стэнфордский университет, г. Стэнфорд, шт. Калифорния

22.1. Введение

Наиболее привлекательная особенность промышленных роботов состоит в том, что они могут выполнять различные задания. Универсальность робота обеспечивается общенностью его механической структуры и подсистемами очувствления. Однако воспользоваться технологической гибкостью робота в полной мере можно только тогда, когда разработка новых управляющих программ выполняется достаточно просто (а значит, с малыми затратами).

В настоящее время существуют три методики разработки программного обеспечения роботов (они перечислены в хронологическом порядке возникновения): программирование в режиме обучения, использование языка программирования робота, использование языка описания задания в виде последовательности состояний и действий.

22.1.1. Программирование в режиме обучения

Методика разработки управляющих программ роботов в режиме обучения была предложена раньше других и к настоящему времени получила широкое распространение. Она предполагает установку манипулятора вручную в требуемые положения, с последующим запоминанием координат звеньев, соответствующих этим положениям. В некоторых из заданных таким образом опорных точек выполняются действия (например, раскрывание захвата или включение сварочной горелки). Программа представляет собой последовательность векторов, определенных в пространстве координат звеньев, и связанных с некоторыми из них сигналов, подаваемых на вспомогательное оборудование. При выполнении такой программы робот последовательно приводит манипулятор в положения, определяемые векторами координат звеньев, и выдает управляющие сигналы. Эта методика разработки программ подробно описана в гл. 19.

Режим обучения не требует сложных аппаратных средств и высокой квалификации программиста. Для его реализации не требуется внешней ЭВМ, и поэтому программирование в режиме обучения широко использовалось задолго до того, как развитие микроэлектроники позволило ввести микроЭВМ в состав устройства управления промышленного робота. У этой методики разработки программ имеются некоторые существенные ограничения, которые, впрочем, относятся большей частью к организации взаимодействия с подсистемами очувствления. Проводя рабочий орган робота по желаемой траектории, программист задает жесткую последовательность перемещений и действий робота — в ней не предусмотрены проверки условий, повторы или вычисления. Для выполнения некоторых классов заданий (например, точечной свар-

ки, окраски распылением, простого манипулирования объектами) этого вполне достаточно. Однако роботизация многих операций (например, сборки, технического контроля) требует активного взаимодействия с подсистемами очувствления, сбора информации, выполнения сложных вычислений. В таких случаях используются языки программирования роботов, располагающие возможностями алгоритмических языков высокого уровня.

22.1.2. Языки программирования роботов

Некоторые роботизированные системы предоставляют пользователю языки программирования, в состав которых введены средства описания взаимодействия с подсистемами очувствления и движений манипулятора (см. гл. 20, 21). Основное преимущество языков управления роботом — возможность использования вырабатываемых подсистемами очувствления (зрительного, силомоментного и других типов) в рабочем режиме данных для оперативной модификации управляющей программы. Взаимодействие с подсистемами очувствления резко снижает требования к точности размещения составляющих элементов технологической среды, что позволяет существенно расширить диапазон применения роботов.

В серийно выпускаемых роботизированных системах используются языки программирования роботов ВАЛ [1], РЭЙЛ [2] и АМЛ [3]. Языки ВЭЙВ [4] и АЛ [5] относятся к группе экспериментальных. Обзор существующих языков программирования роботов этого уровня приведен в [6] и [7].

Основной недостаток языков программирования роботов заключается в сложности их использования: программист должен хорошо владеть методами разработки программного обеспечения и уметь разрабатывать стратегию поведения робота на основе взаимодействия с подсистемами очувствления. Требующаяся для этого квалификация намного превышает уровень рабочих, занятых выполнением роботизируемых операций традиционными способами. Сложность разработки программы может быть очень велика, особенно для заданий, выполнение которых требует сложных перемещений робота в пространстве, корректируемых по данным, формируемым подсистемой очувствления. Даже тогда, когда задание несложное (как большинство операций, выполняемых сегодня промышленными роботами), затраты на разработку программного обеспечения роботизированной системы сравнимы со стоимостью робота. Это вполне согласуется с общей тенденцией роста затрат на разработку программного обеспечения и снижения стоимости аппаратных средств. В таких условиях естественно желание упростить процесс разработки программ.

22.1.3. Программирование на уровне заданий

В процессе развития робототехники многократно предпринимались попытки реализовать преимущества языков программирования роботов без необходимости привлечения опытных программистов. Один из подходов решения этой задачи предполагает расширение методики программирования в режиме обучения за счет введения в нее приемов организации взаимодействия с подсистемами очувствления и средств принятия решений в процессе выполнения программы. Другой подход, получивший название программирования на уровне задания, предполагает вместо описания действий робота, приводящих к выполнению задания, описывать само задание в терминах положений элементов технологической среды. Описание задания не связано с особенностями робота, который будет его выполнять: в него не входят описания траекторий или опорных точек. В качестве входной информации в системе программирования на уровне задания используются полные геометрические модели технологической среды и робота, поэтому такие системы иногда называют системами моделирования технологической среды. Описанные подходы не получили такого распространения, как программирование в режиме обучения.

В языке описания задания действия роботов в явном виде не представляются, описываются только результаты их выполнения. Например, пользователь указывает, что шпильку следует вставить в отверстие, но не описывает последовательность движений и действий манипулятора, необходимых для выполнения этого действия. Для преобразования описания задания в описание действий робота служит планировщик заданий. Для выполнения такого преобразования планировщик заданий должен располагать описаниями объектов, составляющих технологическую среду робота, работающего с этими объектами, а также начального и конечного состояний. На выходе планировщик заданий должен формировать управляющую программу робота, выполнение которой при заданном начальном состоянии переведет технологическую среду в желаемое конечное состояние. Для того чтобы построенная программа была достаточно надежной, планировщик должен включать в нее совмещающие и защищенные движения, а также блоки обработки аварийных ситуаций. Предполагается, что при выполнении управляющей программы робота планировщик не используется. Следовательно, в формируемую планировщиком программу должны войти команды, организующие взаимодействие с подсистемами очувствления, и обрабатывающие полученные от них данные.

В настоящее время серийно поставляемых систем программирования на уровне задания не существует. К системам экспериментального типа можно отнести АУТОПАСС [8], ЛАМА [9], АЛ [10] (условно) и РАПТ [11]. В настоящее время активно решаются многие задачи, связанные с разработкой систем программирования на уровне задания. В течение ближайших трех лет следует ждать появления опытных вариантов, а в течение пяти лет — и простейших промышленных образцов таких систем.

22.1.4. Компоненты системы программирования на уровне задания

Модель технологической среды должна включать в себя: геометрические описания всех входящих в нее объектов (в том числе — роботов); описания физических свойств всех объектов (например, массы, моментов инерции, структуры поверхности); кинематические описания всех перемещающихся объектов; описание характеристик роботов (например, рабочих диапазонов перемещения звеньев, предельных ускорений, погрешностей системы управления, чувствительности подсистем очувствления).

Кроме того, для практической системы в модель технологической среды обязательно должны входить в явном виде характеристики точности задания параметров модели (например, точность определения размеров объектов, параметров их положения).

Планирование задания включает в себя следующие этапы: планирование больших перемещений, планирование захватывания, планирование малых перемещений.

Планирование больших перемещений. При описании задания основное внимание уделяется объектам и их перемещениям. Однако для того, чтобы переместить объект с одного места на другое, должен двигаться многозвенный манипулятор робота. Отсюда возникает необходимость планирования больших перемещений объекта и манипулятора по траекториям, исключающим их столкновения с другими элементами технологической среды (форма и расположение которых заданы в ее модели).

Планирование захватывания. Захватывание — одно из важнейших действий, входящих в управляющую программу робота, поскольку его выполнение оказывает влияние на все последующие перемещения и действия робота. Планировщик захватывания должен выбрать способ, исключающий столкновения в момент захватывания или перемещения объекта. Кроме того, планировщик захватывания выбирает оптимальную структуру захвата, гарантирующую надежную фиксацию захваченного объекта.

Планирование малых перемещений. Погрешности определения параметров модели технологической среды оказывают определенное влияние на зоны, в которых манипуляторы роботов могут перемещаться без угрозы столкновений. Поэтому для выполнения заданий недостаточно выполнения только позиционирующих перемещений рабочего органа: при подводе его к поверхностям необходимы защищенные движения, а при возникновении контакта с поверхностью — совмещающие движения. Планировщик заданий должен на основе описания задания определить, к какому классу относятся те или иные перемещения, необходимые для его выполнения.

Перечисленные процедуры планирования могут вызываться многократно в процессе разработки одной программы. Неопределенности, возникшие при планировании какой-либо части задания, должны учитываться при дальнейшем планировании. Большинство таких неопределенностей возникают вследствие неточности модели технологической среды и дополнительных погрешностей, вносимых в нее за счет действий робота. В последних работах, посвященных архитектуре систем программирования на уровне задания, предложено для слежения за зонами неопределенности ввести специальный планировщик, использующий математический аппарат символьных алгебраических вычислений.

22.1.5. Автоматическое программирование роботов

В ближайшем будущем пользователи будут описывать задания в виде последовательности относительно несложных директив, указывающих, что должно быть сделано для выполнения, например, операции сборки.

В дальнейшем составление таких описаний может также быть автоматизировано. Предполагается появление систем планирования сборки, входной язык которых будет описывать не процесс сборки, а собираемое изделие. Такой планировщик сборки по информации, извлеченной из базы данных системы автоматизированного проектирования, будет строить описания заданий сбор-

ки, которые впоследствии будут преобразовываться планировщиком заданий в управляющие программы роботов (см. выше).

Вопросы автоматизации планирования всегда находились в центре внимания исследователей, занимающихся проблемой искусственного интеллекта. Как правило, они рассматривались на примере упрощенной среды, состоящей из кубиков, переставлявшихся автоматизированной системой. С такой моделью среды работали программы ХЭКЕР [12], способные отыскивать ошибки в задаваемых последовательностях действий и строить новые последовательности, приводящие к тому же результату, и НОЙ [13], генерировавшая частично упорядоченные планы выполнения заданий. Как правило, методы, предложенные разработчиками таких программ, могут использоваться и в случае большего геометрического разнообразия объектов, входящих в модель среды. Заслуживает упоминания единственный планировщик, работавший с моделью реальной среды — программа БИЛД [14]. Объекты, составлявшие среду, также представляли собой кубики, но каждому объекту соответствовала геометрическая модель, и учитывалось действие сил тяжести и трения. Зоны неопределенности не учитывались. В терминологии настоящей главы программу БИЛД можно считать гибридом планировщика сборки и планировщика заданий.

22.2. Модели

Оставшаяся часть главы посвящена обсуждению роли моделей в синтезе управляющих программ роботов. Вначале рассматриваются все используемые модели и способы их построения.

22.2.1. Модель технологической среды

Основная часть модели среды — геометрические описания составляющих ее объектов. Основной источник геометрических моделей — система автоматизированного проектирования, хотя они могут строиться и с помощью системы интерактивной графики [15]. Три основных типа САПР используют следующие способы представления объемных тел:

линиями: объекты представляют в форме совокупности ребер, представленных отрезками прямых дуг;

поверхностями: объекты представляются в форме совокупности граней;

объемами: объекты представляются в форме совокупности элементарных тел — примитивов.

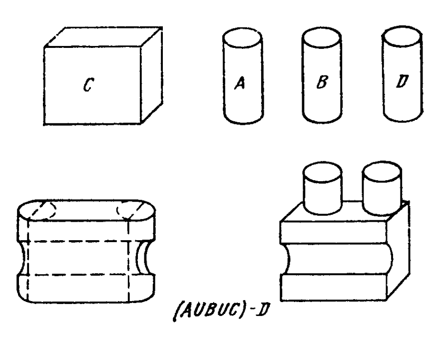


Рис. 22.1. Два объекта, изображенные снизу, получены операциями над примитивами, изображенными сверху. Располагая примитивы по-разному, можно получить различные объекты

Все системы первого типа и некоторые — второго не обеспечивают всей информации, необходимой для планирования заданий. Например, совокупность ребер (иначе — каркасная модель) не позволяет описать произвольный многогранник [16]. Далее, предполагается, что геометрическое описание объектов составлено в виде совокупности примитивов.

Такие модели строятся с помощью набора операций над примитивами нескольких типов. На рис. 22.1 изображена последовательность построения объекта путем объединения трех примитивов и удаления из полученного тела четвертого примитива. Кроме перечня примитивов, составляющих объект, в модель входят описания их пространственных отношений (как правило, в виде преобразований, связывающих системы координат примитивов).

В существующих системах используются самые разнообразные способы представления объектов и номенклатуры примитивов. Наиболее часто объекты представляются в виде многогранников [17], обобщенных цилиндров [18, 19] и с помощью методов конструктивной геометрии объемов [20]. Обзор существующих систем геометрического моделирования приводится в [20] и [21].

Свобода перемещения любого объекта ограничивается другими объектами, присутствующими в моделирующей среде. Структура ограничений определяется формами объектов. Именно поэтому планировщику заданий необходимы их геометрические описания. Дополнительные ограничения на диапазон и характер перемещений объектов накладывает кинематическая структура робота. Если робот поворачивает рычаг или открывает вентиль, то кинематика этих устройств (рычага или вентиля) также накладывает свои ограничения на характер движения манипулятора. Кинематические модели объектов, входящих в технологическую среду, позволяют планировщику заданий определять траектории движений манипулятора с учетом перечисленных ограничений.

Большая часть информационных структур, составляющих модель технологической среды, остается неизменной в процессе моделирования. Исключение составляют описания кинематических пар. В результате действий робота могут создаваться новые кинематические пары и исчезать существующие. Например, вставление цилиндрической шпильки в отверстие создает новую кинематическую пару с двумя степенями подвижности вращательного и поступательного типа. Вставление шпильки в отверстие может ограничить перемещение одной плоской детали по поверхности другой, удаляя одну степень подвижности ранее существовавшей кинематической пары. Планировщик заданий должен учитывать все изменения подобного типа. Это осуществляется либо за счет привлечения пользователя, который должен корректировать кинематические модели после выполнения каждого шага задания, либо автоматически, когда планировщик заданий корректирует эти модели по результатам анализа описания задания или выполнявшейся операции.

При планировании робота важную роль играют физические характеристики объектов. Например, масса и моменты инерции деталей определяют максимальную скорость их перемещения и усилие захватывания, надежно фиксирующее их при перемещении. Коэффициент трения между штифтом и стенками отверстия при вставлении определяет условия заклинивания штифта. Физические характеристики манипулятора используются при решении задач динамики и управлении роботом.

Возможности робота характеризуются не только его геометрической, кинематической и физической моделью. Важную роль играют подсистемы очувствления: зрительная, тактильная и силомоментная. Зрительная подсистема может с определенной точностью определять форму объекта в процессе выполнения задания, силомоментная подсистема позволяет выполнять совмещающие движения, с помощью тактильной подсистемы можно решать обе эти задачи, но вопросы ее использования пока еще недостаточно разработаны [22]. Кроме возможностей подсистем очувствления модель робота должна включать в себя его индивидуальные характеристики: рабочие диапазоны звеньев и максимальные скорости их перемещения, точность позиционирования каждого из звеньев, конфигурацию рабочего пространства.

Модель робота сильно усложняет модель технологической среды. К счастью, построение модели каждого типа робота выполняется всего лишь однократно.

22.2.2. Модель задания

Состояние модели технологической среды определяется состоянием всех составляющих ее объектов. Как правило, задания представляются в виде последовательности состояний модели технологической среды или операций, ведущих к изменению ее состояния. Уровень детализации последовательности, необходимой для описания задания, целиком определяется возможностями планировщика заданий.

Взаимное расположение объектов, определяющее состояние модели технологической среды, может быть задано явным образом с помощью смещений и направляющих косинусов для тел и координат звеньев для манипуляторов. Этот способ громоздок, и вследствие этого его применение может повлечь за собой ошибки. Были разработаны альтернативные способы задания расположения объектов: с помощью САПР, используемой как средство указания положений моделей объектов; с использованием робота для задания положений манипулятора и поиска локальных признаков объектов [23]; с использованием языка описания пространственных отношений отдельных элементов объектов, фиксирующих расположение объектов (например, *Грань 1* НА *Грань 2*) [11].

Для указания положения объекта в пространстве с помощью САПР чаще всего пользуются световым пером, движением которого указывают, куда следует переместить объект. К сожалению, с его помощью трудно выполнять некоторые операции, например установку объекта в произвольно ориентированный угол, так как это требует задания направления движения, непараллельного осям координат. Фиксация положений объектов с помощью робота выполняется намного проще, поскольку движения направляются ограничителями, в роли которых выступают физические объекты. Недостаток этого способа — его ограниченная точность. Оба способа формируют описание расположения объектов в виде массива чисел, который сложно интерпретировать и корректировать. Третий метод предполагает описание пространственных отношений, связывающих объекты в задаваемой конфигурации. Например, на рис. 22.2 положение объекта 2 относительно объекта 1 описывается отношениями *f3* НА *f1* и *f4* НА *f2*.

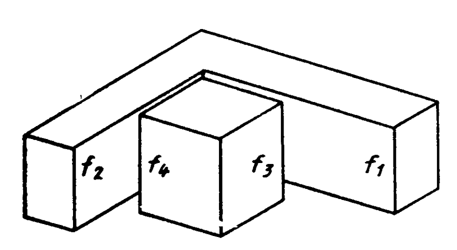


Рис. 22.2. Расположение объектов может быть представлено текстуально — f1 НА f3 и f2 НА f4

Существует несколько работ, посвященных методам определения взаимного расположения объектов по текстовым описаниям пространственных отношений (см. [9, 10, 11, 24]). В основе всех предложенных методов лежит один алгоритм. Вначале определяются системы координат, связанные с объектами и их локальными признаками, затем по описанию отношений составляются уравнения, связывающие эти системы координат, затем эти уравнения группируются по объектам и, наконец, по составленным и сгруппированным уравнениям определяются параметры положения каждого из объектов. В работе [24] предлагается использовать не только уравнения, но и неравенства, задающие односторонние ограничения и позволяющие работать с не полностью заданными состояниями модели среды.

Метод, использующий описание пространственных отношений, намного точнее двух предыдущих. Кроме того, с его помощью можно описывать целые группы состояний объектов (например, один объект находится на поверхности другого без указания точных координат). Текстовое описание пространственных отношений легко читается, а значит, при его интерпретации и редактировании человек делает меньше ошибок. Недостаток метода заключается в необходимости преобразования отношений в массив чисел или уравнения.

Набор состояний модели среды представляет собой совокупность расположений объектов. Если бы задания можно было описать последовательностью состояний модели технологической среды, то это можно было бы делать с помощью языка описания пространственных отношений объектов. К сожалению, это возможно не всегда. В некоторых случаях совокупность расположений объектов задает избыточные ограничения, мешающие выполнению задания. Классический пример затруднения такого рода, возникающего при работе с симметричными объектами, приводится в [26]. При вставлении круглого стержня в круглое отверстие угол разворота стержня вокруг собственной оси не играет роли. Можно избавиться от избыточных ограничений, вводя в состав описания расположения объектов символьного представления пространственных отношений. Это позволит работать с группами состояний среды. Более серьезный недостаток такого способа описания заданий состоит в том, что геометрическая и кинематическая модель состояния среды, возникающего в результате выполнения некоторой операции, не полностью определяет эту операцию. В частности, при выполнении сборки важно не то, в каком положении будет находиться головка завинчиваемого болта, а то, с каким усилием он затягивался. В общем случае приходится дополнять описание операции, переводящей технологическую среду в новое состояние, набором параметров, определяющих режим ее выполнения.

Задание можно описывать не только последовательностью состояний, но и последовательностью операций (а точнее — последовательностью преобразований состояния модели среды). Таким образом, вместо построения модели объекта в желаемом положении можно описать операцию, с помощью которой объект приводится в это положение. Описание задания по-прежнему ориентировано не на робот, а на технологическую среду (например, усилие затяжки болта должно задаваться относительно головки болта, а не какого-либо звена манипулятора). Желаемые результаты выполнения операций описываются с помощью пространственных отношений между объектами. Использование этих отношений позволяет определять не только положения объектов, но и их физические взаимосвязи, возникающие в результате выполнения операции. Например, указание, что грань одного объекта накладывается на грань другого объекта, приведет к выполнению совмещающего движения, продолжающегося до соединения поверхностей, а не останавливающегося в той точке, где согласно геометрической модели такое соединение должно произойти. По этим причинам подход к описанию задания через последовательность операций кажется наиболее предпочтительным [8, 9].

22.3. Планирование больших перемещений

Большими перемещениями считаются движения робота, на которые накладывается только одно ограничение: ни манипулятор робота, ни объект, захваченный им, не должны сталкиваться с другими объектами, входящими в технологическую среду. Планирование больших перемещений и предотвращение столкновений — важнейшие функции планировщика заданий. Для различных предметных областей предложено несколько алгоритмов обхода препятствий. В этом разделе кратко рассмотрены алгоритмы обхода препятствий при движении манипулятора в трехмерном пространстве, относящиеся к трем классам: алгоритмы построения и проверки гипотез, алгоритмы с использованием штрафных функций, алгоритмы с учетом свободного пространства.

Метод построения и проверки гипотез — один из самых ранних алгоритмов предотвращения столкновений. Он включает в себя три основных шага: строится предполагаемая траектория перемещения манипулятора от начального положения к конечному; конечный набор положений манипулятора, принимаемых им при движении по этой траектории, проверяется на наличие столкновений; если обнаружено столкновение, предполагаемая траектория корректируется, в нее вводится обход препятствия. Алгоритм выполняется итеративно до полного исключения столкновений.

Основное преимущество метода построения и проверки гипотез — его простота. Основные вычислительные процедуры — определение возможности столкновения и модификация траектории движения. Для определения возможности столкновения проводится поиск непустого множества, представляющего собой результат пересечения объемов, задаваемых моделями манипулятора и препятствий [38]. Эта операция выполняется с помощью стандартных средств подсистемы геометрического моделирования. В отличие от нее, процедура модификации траектории движения может оказаться достаточно сложной. Как правило, для определения обходной части траектории пользуются аппроксимацией препятствия (например, препятствие заменяется охватывающей его сферой). Такой прием дает хорошие результаты при небольшом числе препятствий, расположенных достаточно далеко друг от друга. Если же рабочее пространство сильно «загромождено», то обычно введение в траекторию обхода одного препятствия приводит к столкновению с другим. Такое явление отмечалось в практических системах [39].

Второй класс алгоритмов предупреждения столкновений предполагает использование штрафных функций, определенных на пространстве положений звеньев манипулятора. Значение штрафной функции зависит от степени удаленности манипулятора от прочих объектов технологической среды. При соприкосновении манипулятора с объектом значение штрафной функции возрастает до бесконечности, а по мере удаления от него оно быстро падает. Окончательно штрафная функция определяется как сумма штрафных функций, соответствующих всем объектам технологической среды (возможно, с добавлением штрафа за отклонение от кратчайшей траектории). Для любого расположения звеньев манипулятора можно определить значение штрафной функции и ее частных производных по управляющим параметрам звеньев манипулятора. Анализируя эти значения, можно найти локально оптимальное направление перемещения манипулятора. Придерживаясь локальных минимумов штрафной функции, можно построить траекторию движения, представляющую собой некоторый компромисс между желаниями сократить путь и не приближаться к препятствиям.

Метод штрафной функции привлекает простотой учета совокупного влияния нескольких препятствий. К сожалению, это кажущаяся простота. Штрафная функция легко определяется по модели препятствия только для роботов с цилиндрическими и сферическими координатами. Для роботов с другими кинематическими схемами манипуляторов она сильно усложняется. В противном случае не всегда движения роботов, ведущие к уменьшению штрафной функции, оказываются вполне безопасными.

Интересный способ предлагается в работе Хатиба [40]. Предполагается, что штрафная функция определена согласно закону распределения потенциала поля [41]; градиент этого поля в любой точке рабочего пространства рассматривается как сила отталкивания. Кроме того, считается, что из конечной точки траектории действует сила притяжения. Траектория движения манипулятора определяется совместным действием этих сил и кинематических ограничений. Основной недостаток метода штрафных функций заключается в локальности информации, используемой для построения траекторий безопасного движения. Следуя локальному минимуму штрафной функции, можно прийти в положение, в котором любое перемещение будет вести к росту этой функции. В этом случае приходится отступать и возобновлять поиск в другом направлении. Пользуясь только локальной информацией, довольно сложно определить величину отступления. Это заставляет объединять методы штрафных функций и построения гипотез (ниже будут рассмотрены построенные таким образом методы с учетом свободного пространства). В чистом виде методы штрафных функций можно применять тогда, когда требуется небольшая модификация заранее определенной траектории. При этом не требуется поиск оптимальной траектории, который составляет один из важнейших этапов построения программы робота.

К третьей группе методов исключения столкновений относятся алгоритмы, в явном виде строящие множества положений манипулятора, при которых столкновения отсутствуют. Эти множества называются свободным пространством. Задача планирования траектории сводится к ее построению в пределах свободного пространства — отсутствие столкновений гарантируется. Алгоритмы этой группы отличаются друг от друга способом построения и представления множеств положений манипуляторов, соответствующих свободному пространству.

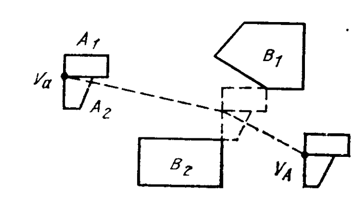
В неопубликованной статье [37] Виддос описывает один из таких алгоритмов в приложении к манипулятору, разработанному в Стэнфордском университете [42]. В этом алгоритме свободное пространство, выраженное в терминах управляющих параметров звеньев, аппроксимируется совокупностями прямоугольных дискретов, соответствующих положению первых двух звеньев манипуляторов. В каждом из дискретов содержится информация о возможном диапазоне изменения управляющего параметра третьего звена (он может быть и нулевым). Основная вычислительная процедура определяет диапазоны положений первых трех звеньев манипулятора, при которых столкновения с препятствиями исключены. Первоначально во всех дискретах записан максимальный диапазон перемещений третьего звена. Затем на поверхность всех препятствий, находящихся в рабочей зоне первых двух звеньев, наносится сетка. Для узлов этой сетки определяется допустимый диапазон перемещений третьего звена, который заменяет значения в соответствующих этим точкам дискретах. По завершении алгоритма в дискретном поле записана вся информация о свободном пространстве в терминах положений первых трех звеньев манипулятора.

В приведенном описании не учитывалось наличие трех последних звеньев манипулятора. В методе Виддоса оно рассматривается как жестко прикрепленное к третьему звену устройство, размеры которого учитываются при определении допустимых диапазонов перемещения третьего звена. Для учета возможного изменения положения запястья процедура определения свободного пространства выполняется трижды. При первом вызове запястье занимает исходное положение, при втором — конечное, при третьем—промежуточное. Построение в результате области свободного пространства представляется в виде графа, в котором три набора (слоя) дискретов соответствуют узлам. Два узла соединяются ветвью тогда, когда они соответствуют смежным дискретам с пересекающимися диапазонами допустимого перемещения третьего звена. Ветвями соединяются также дискреты, соответствующие начальному положению манипулятора при исходном положении запястья, и дискреты, соответствующие начальному положению манипулятора при конечном положении запястья. Все пути построенного графа от начальной к конечной точке соответствуют траекториям движения без столкновений. Перемещение по ветвям, соединяющим дискреты одного слоя, соответствует изменению положения трех первых звеньев, а по ветвям соединяющим дискреты разных слев, — изменению положения запястья.

В работах Юдапа [35, 36] предлагается другой способ определения свободного пространства для того же манипулятора. При этом манипулятор аппроксимируется двумя цилиндрами (первые три звена и запястья в отдельности). Вначале определяется представление свободного пространства для первых трех звеньев (цилиндр запястья при этом игнорируется). Базовое представление состоит из прямоугольных дискретов, определенных в пространстве координат первых трех звеньев. Виддос пользуется тем же представлением, но с фиксированными размерами дискретов. В алгоритме Юдапа, напротив, каждый дискрет может разделяться на два (аналогично алгоритму удаления невидимых линий Уорнока [43]). Допустимый диапазон положений третьего звена по каждому дискрету рассчитывается по модели третьего звена и моделям увеличенных препятствий. Это — существенное улучшение алгоритма Виддоса, в котором используются точки, равномерно распределенные по поверхности препятствий. Затем определяется безопасная траектория движения первых трех звеньев манипулятора. Это осуществляется последовательным модифицированием прямолинейной траектории, соединяющей начальную и конечную точки. Модификация траектории продолжается до тех пор, пока она не будет целиком пролегать в свободном пространстве. Затем траектория корректируется с помощью эвристического алгоритма, позволяющего «втиснуть» перемещение запястья в свободное пространство.

Описанные алгоритмы отличаются друг от друга способами определения свободного пространства в системе координат звеньев манипулятора, но оба ориентируются на манипулятор, разработанный в Стэнфордском университете, и используют его особенности: по сравнению с первыми тремя звеньями запястье достаточно мало, звенья хорошо аппроксимируются цилиндрами, все звенья вращательные (кроме третьего — поступательного).

Лоцано-Перес [30] описывает алгоритм определения свободного пространства для



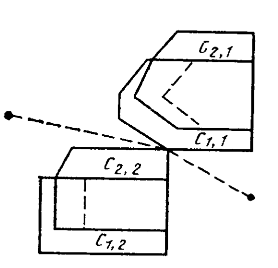


Рис. 22.3. Задача проводки объекта A, состоящего из двух четырехугольников A_1 и A_2, между препятствиями B_1 и B_2 эквивалентна задаче проводки точки V_A между модифицированными препятствиями C_{ij}. Предполагается, что объект A нельзя вращать

манипулятора с прямоугольной системой координат. Он основан на определении допустимых положений манипулятора. На рис. 22.3 показана идея алгоритма для случая двухмерного пространства (проводка произвольного многоугольника между препятствиями без его вращения). Подвижный объект и препятствия разбиваются на совокупности выпуклых многоугольников. Точка отсчета выбирается на подвижном объекте (на рисунке — V_A). Затем все препятствия увеличиваются таким образом, чтобы компенсировать сжатие подвижного объекта до точки. Траектория движения точки во вспомогательном пространстве положений в точности совпадает с искомой траекторией в исходном пространстве. Если разрешается вращение подвижного объекта, то для решения двухмерной задачи необходимо трехмерное вспомогательное пространство положений. Трехмерная задача с разрешением поворотов потребует шестимерного вспомогательного пространства.

Тот же автор [30, 31] описывает точный метод построения вспомогательного пространства (с увеличенными препятствиями) для манипулятора с прямоугольной системой координат. Свободное пространство представляется древовидной структурой многоугольных ячеек различной величины. Вращение манипулятора учитывается с помощью нескольких экземпляров представления свободного пространства. Каждый экземпляр соответствует определенному диапазону углов поворота вращательного звена (обобщение метода трех слоев по Виддосу). Траектория строится как путь в графе, узлы которого соответствуют ячейкам свободного пространства, а ветви связывают перекрывающиеся ячейки. Методика построения траектории описана у Лоцано-Переса и Весли [32].

Брукс [27] предложил метод учета свободного пространства с помощью описаний свободных проходов между препятствиями (с использованием обобщенных конусов [18, 19]). Впоследствии те же описания могут использоваться в качестве ограничителей движения выпуклых объектов, перемещающихся по центру проходов. В позднейшей работе [28] описано обобщение этого способа для робота с шестью вращательными звеньями, выполняющего движения по четырем степеням подвижности, определенным в прямоугольной системе координат (параллельно осям и вращение захвата). Оба алгоритма были реализованы и на практике показали высокую эффективность.

Основное преимущество рассмотренных методов состоит в том, что после заполнения структуры, описывающей свободное пространство, построение траектории гарантируется (если, конечно, она в принципе может быть построена в пределах учтенного свободного пространства). Однако следует иметь в виду, что перечисленными методами учитывается не все свободное пространство, а только его часть. Кроме того, построенная траектория может быть безопасной, но далеко не самой короткой. Для выполнения процедуры поиска свободного пространства требуется большая вычислительная мощность. Когда в рабочем пространстве робота немного препятствий, более эффективными оказываются методы, не ведущие учета свободного пространства. Однако по мере «загромождения» рабочего пространства эффективность таких методов быстро падает до нуля: они не дают приемлемых решений или затрачивают на их поиск слишком много времени. Большинство рассмотренных методов предотвращения столкновений тесно связаны с приемами аппроксимации трехмерных объектов. Предполагается, что для решения задачи предотвращения столкновений особенности формы объектов не играют существенной роли. Однако для планирования захватывания или совмещающих движений данные об особенностях формы объектов необходимы. В отличие от остальных методов алгоритм Лоцано-Переса [30] позволяет приближаться к препятствиям вплотную и может применяться как для планирования больших перемещений, так и для планирования захватывания (а также выбора оп-

тимальной конфигурации захвата). К сожалению, этот алгоритм привязан к прямоугольной системе координат робота, и вращательные движения учитываются им лишь приближенно. Общий алгоритм предотвращения столкновений, ориентированный на использование универсального робота с шарнирными сочленениями звеньев и произвольные перемещения рабочего органа, пока еще не создан (хотя уже имеется теоретическая формулировка подобного алгоритма [34]).

22.4. Планирование захватывания

Как правило, любая роботизированная операция начинается с захватывания объекта роботом, причем способ фиксации детали в захвате во многом определяет дальнейшие действия роботизированной системы. В настоящее время существует несколько методик определения положений звеньев манипулятора, обеспечивающих предотвращение столкновений в момент захватывания, но в целом теоретические вопросы планирования захватывания пока еще недостаточно исследованы.

В этом разделе объект, подлежащий захватыванию, будем называть мишенью. Поверхности, которые робот использует при захватывании, называются захватывающими поверхностями. Положение, в котором находится манипулятор в момент захватывания объекта, называется начальным положением захватывания. Положение, в котором находится манипулятор по завершении переноса объекта к месту назначения, называется конечным положением захватывания.

При определении положения захватывания объектов известной формы должно обеспечиваться следующее.

Безопасность. Следует исключить возможность повреждения робота в начальном и конечном положениях захватывания.

Исполнимость. Робот должен иметь возможность привести манипулятор в начальное положение захватывания и с захваченным объектом без столкновений перейти в конечное положение захватывания.

Надежность. Захват должен надежно удерживать захваченный объект, противодействуя силам, возникающим при перемещениях и сборочных операциях.

Если начальное положение мишени известно лишь приближенно, то после захватывания эта неопределенность устраняется. Это очень важное свойство.

Выбор положений захватывания, удовлетворяющих первому и второму требованиям, тесно связан с задачей предотвращения столкновений, но имеет специфические особенности. Во-первых, следует определить только одно положение манипулятора (а не траекторию). Во-вторых, в момент захватывания робот соприкасается с мишенью и важную роль начинает играть ее форма. При выборе положений захватывания рассматриваются положения манипулятора, при которых захватывающие поверхности соприкасаются с мишенью, а манипулятор не соприкасается с какими-либо объектами. В-третьих, при планировании захватывания приходится учитывать не только текущее состояние технологической среды, но и особенности технологических операций, которые будут выполняться над мишенью. Перечисленные отличия заставляют отделить планирование захватывания от предотвращения столкновений.

Большинство существующих методов выбора положений захватывания состоит из трех шагов. На первом шаге формируется множество возможных положений захватывания. На втором шаге из этого множества удаляются положения, которые конкретный робот не может принять или принятие которых ведет к столкновениям. На третьем шаге из оставшихся положений выбирается одно, в некотором смысле оптимальное.

Начальное формирование множества возможных положений захватывания может выполняться из соображений геометрической формы мишени [9, 15, 30, 44, 45], надежности [46, 47] или устранения неопределенности [48]. Для захватов параллельного действия выбор положения захватывания определяется условием параллельности захватывающих поверхностей соответствующим поверхностям мишени. Дополнительным критерием, учитывающимся при выборе места захвата на мишени, является минимальность моментов инерции относительно оси захвата.

В работах Пола [46] и Тейлора [10] из рассмотрения исключаются недостижимые положения захватывания, у других авторов отбрасываются не только эти положения, но и другие, в которых нарушаются какие-либо условия геометрического характера. К таким условиям, вытекающим из необходимости избегать столкновений, разные авторы относят:

возможность столкновения захвата и соседних объектов в начальном положении захватывания [9, 30, 45, 47];

одностороннюю выпуклость (весь объем некоторого объекта лежит с одной стороны от заданной плоскости) [44];

существование безопасной траектории приведения манипулятора в начальное положение захватывания [9, 30, 45];

возможность столкновения захвата и соседних объектов в начальном положении захватывания, возможность столкновения захвата и соседних объектов в конечном положении захватывания, возможность столкновений любой части манипулятора и соседних объектов в конечном положении захватывания и существование безопасной траектории движения манипулятора из начального положения захватывания в конечное [9, 30].

Из возможных положений захвата следует выбрать оптимальное. В качестве критерия оптимальности можно использовать степень надежности захватывания [15, 49]. Можно также выбрать то положение захватывания, в котором меньше вероятность столкновения из-за неточного определения параметров положения соседних объектов.

Большинство методов планирования захватывания рассматривают лишь какой-нибудь один аспект этого процесса, чаще всего — предотвращение столкновений. Даже в рамках такого узкого подхода рассматриваются не все условия, необходимые для обеспечения безопасности захватывания. В частности, большинство алгоритмов ограничиваются определением положения захвата в начальном положении захватывания по исходному состоянию технологической среды. Ни один из них не рассматривает ограничения, накладываемые при планировании подвода манипулятора в начальное положение захватывания. Все алгоритмы работают только с ограниченным числом моделей объектов (как правило, объекты должны быть представлены в виде комбинаций многогранников и цилиндров) и простейшими захватами (как правило, с параллельным перемещением губок). В большинстве случаев алгоритмы не позволяют обобщение способа представления объектов и замену типа захвата.

Другие аспекты планирования захвата пока еще не получили должного развития. Учет надежности захватывания в имеющихся алгоритмах [46, 47] сводится к определению смещения центра тяжести объекта относительно оси захвата. Минимизируя это смещение, можно сократить моменты, действующие на захватывающие поверхности. В работе Ханафуса и Асада [49] приводится анализ методов надежного захватывания в отсутствие сил трения, но в ней не рассматриваются аспекты безопасности и исполнимости. Обобщение результатов анализа для случая ненулевых сил трения не выполнялось.

До сих пор мы предполагали, что на момент захватывания точно определены параметры положения всех объектов, составляющих технологическую среду. Вопросы планирования захватывания в условиях неопределенности положения мишени или захвата пока еще мало исследованы. Тем не менее во многих приложениях перед захватыванием приходится уточнять взаимное расположение мишени и захвата. Для этого используются подсистемы очувствления. Для определения параметров положения объекта, находящегося на ленте движущегося транспортера, могут использоваться зрительные и тактильные подсистемы. Для многих конкретных случаев были разработаны методы устранения неопределенности, но общей теории построения стратегии захватывания не существует. В работе [46] описывается стратегия совмещения захвата с мишенью по данным, вырабатываемым датчиками касания. Мэсон [48] описывает альтернативные стратегии базирования мишени в захвате под действием сил трения.

22.5. Планирование малых перемещений

Неточность модели технологической среды и неизбежно ограниченная точность робота ограничивают множество безопасных перемещений манипулятора. В частности, для выполнения большинства заданий недостаточно позиционирующих движений; при подводе рабочего органа к поверхности объекта необходимо выполнение защищенных движений, а после возникновения контакта с поверхностью — совмещающих движений. Планировщик заданий должен планировать движения всех трех перечисленных типов по описанию задания. В работе [50] Мэсон описывает метод задания совмещающих движений, использующий кинематические модели манипулятора и выполняемой операции. В качестве входной информации используется номинальная траектория движения манипулятора. Определение номинальной траектории выполняется методами предотвращения столкновений (см. выше). Однако имеется одно существенное отличие: при выполнении совмещающих движений набор допустимых положений манипулятора ограничивается не только его кинематическими особенностями, но и спецификой выполняемой операции. Кинематическая модель операции ограничивает множество допустимых положений манипулятора некоторым участком поверхности объема, соответствующего полному множеству положений в пространстве координат манипулятора. Такой участок называется C-поверхностью. При работе алгоритма предотвращения столкновений в процессе планирования номинальной траектории следует учитывать и это ограничение. С помощью аналогичных ограничений Лоцано-Перес [30] описывает допустимые положе-

ния захватывания. Положения манипулятора, в которых захватывающие поверхности соприкасаются с захватываемыми поверхностями мишени, определяют *С*-поверхность. Допустимые положения захватывания принадлежат *С*-поверхности за исключением из нее зон, определяемых влиянием объектов, ограничивающих свободу перемещений манипулятора. На практике как *С*-поверхность, так и исключаемые из нее зоны очень трудно точно определить.

Ниже предлагается стратегия планирования совмещающих движений, включающая в себя два шага. На первом безопасная траектория отыскивается по *С*-поверхности, определенной для данного задания по модели технологической среды [30], а на втором информация, полученная от подсистемы силомоментного очувствления, используется для минимизации отклонения манипулятора от фактической *С*-поверхности при его движении по рассчитанной ранее траектории [50]. Такая двухшаговая процедура предполагает, что начальное положение робота принадлежит *С*-поверхности, т. е. уже имеется контакт рабочего органа с мишенью. Задача обеспечения такого контакта не решается. Предполагается, что его можно достигнуть с помощью защищенных движений.

Защищенные движения должны привести манипулятор в положение, принадлежащее *С*-поверхности, не развивая при этом слишком больших усилий. Усилия ограничиваются во избежание повреждения робота или объектов технологической среды, а также непреднамеренного изменения положений этих объектов. Поскольку точные положения объектов и манипулятора неизвестны, для обнаружения контакта и ограничения усилий необходимо воспользоваться подсистемами очувствления (тактильной или силомоментной). Кроме того, подвод рабочего органа должен выполняться на малой скорости, для того чтобы в момент возникновения контакта успеть остановить манипулятор вовремя, до того, как в точке контакта разовьется большое усилие.

Планировщик заданий должен определить траекторию подвода манипулятора к *С*-поверхности и предельные усилия, которые могут развиваться при выполнении защищенных движений. Траектория подвода определяется как траектория движения манипулятора, исключающая столкновения со всеми объектами технологической среды, кроме одного — мишени, на поверхности которой она оканчивается. Это — частный случай задачи предотвращения столкновений, обсуждавшийся выше. Расчет предельных усилий для защищенных движений — очень сложная задача, поскольку эта величина зависит от жесткости и устойчивости объектов, определяющих *С*-поверхность. Конечно, всегда можно воспользоваться наименьшим значением, равным порогу чувствительности подсистемы очувствления, однако в этом случае манипулятор будет перемещаться очень медленно, а время выполнения задания — возрастать. Приближенные значения предельных усилий можно определить по упрощенным моделям операций [14, 48].

Когда положение манипулятора относительно системы координат, связанной с технологической средой, неизвестно, но нельзя утверждать, что *С*-поверхность, найденная в результате выполнения защищенных движений, принадлежит мишени. В этом случае построения номинальной траектории подвода недостаточно. Стратегия планирования малых перемещений в таких случаях должна предусматривать использование подсистем очувствления, подтверждающих, что найденная *С*-поверхность принадлежит именно мишени. В литературе описано четыре примера таких стратегий применительно к задаче вставления стержня в отверстие.

Качание стержня. Иноу [51] отметил, что, поворачивая стержень, можно увеличить вероятность того, что при первом соприкосновении часть стержня попадает в отверстие (рис. 22.4). В этом случае зона неопределенности примыкает лишь к одной из поверхностей. Прикладывая определенные усилия в вертикальном направлении, можно преодолеть возникающие в точке контакта силы трения и протолкнуть стержень в отверстие до возникновения контакта в двух точках. После этого можно выполнять совмещающие движения, поскольку *С*-поверхность уже достигнута.

Зенковка отверстия. Зенковка отверстия приводит к такому же эффекту, что и покачивание стержня (см. рис. 22.4). При наличии зенковки нет необходимости в выравнивании стержня в отверстии, что ускоряет выполнение операции.

Рис. 22.4. Наличие неопределенности взаимного расположения стержня и отверстия приводит к тому, что при выполнении вставления могут возникнуть несколько различных вариантов

Поиск. После возникновения контакта, смещаясь вдоль оси x вправо или влево, можно определить, на какой из *С*-поверхностей находится стержень. Совмещающее перемещение выполняется до момента выхода на край отверстия. Если в горизонтальном направлении пройдено достаточно большое расстояние, а край отверстия не обнаружен, направление движения меняется на противоположное. Предельное расстояние определяется размерами общей области зоны неопределенности и каждой из *С*-поверхностей.

Смещенный поиск. Стратегия поиска может привести к выполнению лишнего движения в процессе идентификации *С*-поверхности. Иноу предложил [51] ввести принудительное смещение начального положения стержня, обеспечивая успешное завершение поиска за одно движение. Величина такого смещения определяется так же, как предельное расстояние поиска (см. выше).

При работе с заданиями типа только что рассмотренного вставления стержня в отверстие планировщик заданий должен выбрать стратегию, а затем — параметры движений, предусмотренных выбранной стратегией. Выбор стратегии зависит от особенностей задания (например, от наличия зенковки), величины зоны неопределенности и времени, отведенного на выполнение задания. Временные оценки стратегий могут браться либо по наихудшему варианту (по наибольшим перемещениям), либо взвешенно (с учетом вероятностей движений). Последний вариант предполагает оценку распределения вероятностей положения мишени в зоне неопределенности и наличие способа переноса этого распределения на *С*-поверхности. Отметим, что некоторые стратегии эффективны только до некоторых предельных величин зоны неопределенности.

Когда фактическое состояние технологической среды отличается от используемой планировщиком модели непредсказуемым образом, любая из перечисленных стратегий может не дать результата. Поэтому в программу робота должны быть внесены проверки, обеспечивающие контроль правильности выполнения операции. В частности, можно проверять, попадает ли фактически выявленная точка соприкосновения с *С*-поверхностью в диапазон допустимых положений, определенный по оценке совокупной погрешности системы модель среды — робот. В упрощенном варианте такая проверка использовалась для определения зон защищенных перемещений [9]. Брукс [25] предложил более общий способ определения контрольных точек, в которых должны быть опрошены подсистемы очувствления.

Было предложено два подхода к разработке взаимодействующих с подсистемами очувствления программ на уровне задания [9 и 12]. Основная идея подходов — общая, она предполагает представление стратегии планирования движений для выполнения той или иной группы заданий в виде параметризованной программы робота (иначе называющейся скелетом). В состав скелета программы входят описатели всех движений, проверок и вычислительных процедур, необходимых в процессе выполнения задания, но многие из используемых в них параметров не определены численно. Возможность использования скелетной программы для выполнения конкретного задания, как прежде, зависит от особенностей модели среды и величин допусков и погрешностей. Тейлор [10] предложил следующий способ выбора стратегии планирования движений. Вначале определяются значения нескольких параметров, характеризующих конкретное задание и условия его выполнения. Например, для задания вставления стержня в отверстие таким параметром может служить размер зоны неопределенности. Затем по этим значениям выбирается одна из нескольких заранее выбранных стратегий. Выбрав стратегию, планировщик заданий определяет значения дополнительных параметров, необходимых для построения траекторий движения, соответствующих этой стратегии (траекторий подвода и захватывающих движений). Дополнительным критерием сравнения стратегий может служить оценка времени, необходимого для выполнения диктуемых ими движений. После окончательного выбора стратегии конкретные значения параметров подставляются в соответствующую ей скелетную программу.

Построение стратегии планирования движений с использованием скелетных программ предполагает, что для типовых заданий геометрические отношения объектов предсказуемы и в зависимости от их сочетаний задания можно разбить на несколько групп, каждой из которых можно поставить в соответствие скелетную программу. Это предположение необходимо потому, что последовательность движений, зафиксированная скелетной программой, приводит к успешному выполнению задания только при определенных геометрических отношениях объектов. В частности, появление дополнительных объектов может воспрепятствовать выполнению некоторых движений, предусмотренных скелетной программой.

Для разработки устойчивых к малым изменениям технологической среды программ необходимо учитывать геометрические особенности выполнения задания. Скорее все-

го, при разработке систем программирования на уровне задания все больше внимания будет уделяться использованию заранее составленных стратегий. В настоящее время эти тенденции развиваются независимо друг от друга. Авторам кажется, что описанная выше методика анализа задания в пространстве положений может послужить удобным средством их объединения. Пространство положений и C-поверхности уже используются при планировании захватывания, предотвращении столкновений и построении траекторий совмещающих движений [30, 31, 50].

22.6. Учет неопределенности

Все описанные выше модули планировщика заданий работают в условиях не полностью определенной модели технологической среды. По мере выполнения различных действий начальные зоны неопределенности модели могут расти.

22.6.1. Физическая неопределенность

В этом разделе рассматриваются три основных источника физической неопределенности.

Сложность механических устройств. Манипулятор робота представляет собой весьма сложное механическое устройство с ограниченной скоростью перемещения, грузоподъемностью, позиционной точностью и точностью повторного позиционирования. Под абсолютной позиционной точностью манипулятора понимается максимальная величина отклонения фактического положения рабочего органа после позиционирования от целевого положения. Эта величина может зависеть от температуры воздуха, величины нагрузки, скорости перемещения и конкретных параметров целевого положения (определяющих, в какой точке рабочего пространства оно находится). Более того, если все перечисленные параметры зафиксировать, при многократном выполнении позиционирования рабочий орган не будет попадать в ту же самую точку пространства — каждое очередное позиционирование будет приводить его в новое положение. Разброс этих положений характеризуется точностью повторного позиционирования. Возможное влияние стохастических эффектов и медленного дрейфа рабочих характеристик можно исключить периодическим калиброванием. Погрешности позиционирования и повторного позиционирования современных роботов достаточно велики для того, чтобы исключить возможность разработки программы без применения средств очувствления на этапе выполнения задания. В принципе позиционную точность манипулятора можно повысить, ужесточив требования к его изготовлению и повысив структурную жесткость, но это ведет к значительному повышению его стоимости. Поэтому точность механической части робота всегда конечна.

Неидентичность объектов. Неидентичность обрабатываемых роботом экземпляров одной и той же детали тоже осложняет программирование. Невозможно изготовить даже две детали, в точности совпадающие по всем размерам. В процессе проектирования конструктор назначает допуски на длины, диаметры и углы. Значение размера конкретной детали может быть любым, лишь бы оно не выходило за границы заданного допуска. Величина допуска оказывает большое влияние на результаты выполнения задания роботом. Например, при сборке нескольких деталей малые отклонения в размерах каждой из них могут суммироваться, приводя к большим погрешностям.

Невозможность точного определения параметров исходных положений объектов. Часто важнейшим источником неопределенности оказываются погрешности параметров положения детали, вводимой в технологическую среду. Механические питатели не обеспечивают высокой точности подачи детали — погрешности могут превышать половину ее размера. Если деталь подается ленточным транспортером, то погрешности могут быть еще больше. В некоторых случаях планировщик заданий предусматривает специальные действия для устранения неопределенности такого рода (например, описанные выше стратегии захватывания и защищенные движения).

Помимо физической неопределенности в модели технологической среды всегда присутствует неопределенность другого типа, возникающая вследствие ограниченной точности датчиков и подсистем очувствления. Обычно величину погрешности, вносимой датчиками, можно выразить как функцию амплитуды выходного сигнала датчика (или отсчета, если речь идет о цифровом датчике).

В модели технологической среды можно учесть влияние погрешностей. Однажды возникшая неопределенность должна учитываться при планировании всех последующих шагов задания, поэтому необходимо внести информацию о ней в модель технологической среды. Это можно сделать одним из двух способов.

22.6.2. Зоны неопределенности

Численный метод [10]. Величины начальных погрешностей оцениваются численно, функции их пересчета при выполнении каких-либо действий заменяются кусочно-линейными приближениями, величина погрешности после выполнения действий определяется методами линейного программирования. Когда значение погрешности превышает некоторую предельную величину, в программу робота включаются действия для устранения неопределенности (опрос подсистем очувствления или один из приемов, использующих C-поверхности).

Параметрический метод [25]. Параметры технологической среды (положения объектов, параметры рабочего органа и т. п.) и траектории совмещающего движения рассматриваются в качестве переменных. Границы зон неопределенности определяются как функции этих переменных. Преобразование зон неопределенности при выполнении действий сводится к алгебраическим преобразованиям. При планировании траекторий перемещений границы зон неопределенности рассматриваются как дополнительные геометрические ограничения. Если эти ограничения становятся чересчур жесткими, в программу включается опрос подсистем очувствления. Его данные также представляются в аналитическом виде, что позволяет выбирать конкретный тип используемой подсистемы очувствления. Применение релаксационных методов позволяет строить такие программы, в которых для удовлетворения ограничений, связанных с действием, выполняемым, например, в конце задания, в его середине предусмотрен опрос той или иной подсистемы очувствления.

22.7. Заключение

Методика программирования на уровне задания позволяет существенно повысить эффективность работы разработчика программного обеспечения робота. Для создания программных систем, реализующих эту методику в полном объеме необходимо решить некоторые теоретические и практические вопросы, которые уже стали предметом пристального внимания. Хотя в настоящее время промышленно эксплуатируемых систем программирования на уровне задания не существует, ряд важнейших задач уже получил приемлемые решения. К этим задачам относятся планирование траекторий перемещения с предотвращением столкновений, автоматическое захватывание, планирование взаимодействий с подсистемами очувствления, планирование малых перемещений. Перспектива появления практических систем в ближайшем будущем представляется достаточно реалистической.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shimano, B., et al., VAL: a robot programming and control system, Unimation, Danbury, Connecticut, 1977.
2. Franklin, J. W. and Vanderbrug, G. J., Programming Vision and Robotics Systems with RAIL, *SME Robots VI*, March 1982, 392—406.
3. Taylor, R. H., Summers, P. D., and Meyer, J. M., AML: A Manufacturing Language, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 1, No. 3, 1982, pp. 19—41.
4. Paul, R. P., WAVE: A model-based language for manipulator control, *Industrial Robot*, March 1977.
5. Goldman, R. and Mujtaba, M. S., *AL User's Manual*, Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, AIM 344, December 1981.
6. Gruver, W. A., Soroka, B. I., Craig, J. J., and Turner, T. L., Evaluation of Commercially Available Robot Programming Languages, *13th International Symposium on Industrial Robots and Robots 7*, Chicago, April 1983, 12-58—12-68.
7. Lozano-Pérez, T., Robot Programming, *Proceedings of the IEEE*, July 1983.
8. Lieberman, L. I. and Wesley, M. A., AUTOPASS: an automatic programming system for computer controlled mechanical assembly, *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 21, No. 4, 1977, pp. 321—333.
9. Lozano-Pérez, T., The design of a mechanical assembly system, Artificial Intelligence Laboratory. Massachusetts Institute of Technology, AI TR 397, 1976.
10. Taylor, R. H., The synthesis of manipulator control programs from task-level specifications, Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, AIM-282, July 1976.
11. Popplestone, R. J., Ambler, A. P., and Bellos, I., An interpreter for a language for describing assemblies, *Artificial Intelligence*, Vol. 14, No. 1, 1980, pp. 79—107.
12. Sussman, G. J., *A Computer Model of Skill Aquisition*, American Elsevier, New York, 1975.
13. Sacerdoti, E. D., *A Structure for Plans and Behavior*, American Elsevier, New York, 1977.

14. Fahlman, S. E., A planning system for robot construction tasks, *Artificial Intelligence*, Vol. 5, No. 1, 1974.
15. Brady, J. M., Parts Description and Asquisition Using Vision, *Proceedings SPIE*, May 1982.
16. Markowsky, G. and Wesley, M. A., Fleshing Out Wire Frames, *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 24, No. 5, September 1980.
17. Wesley, M. A., et al., A Geometric Modeling System for Automated Mechanical Assembly, *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 24, No. 1, January 1980, pp. 64—74.
18. Binford, T. O., Visual perception by computer, *Proceedings of IEEE Conference on Systems and Control*, 1971.
19. Brooks, R. A., Symbolic Reasoning Among 3-D Models and 2-D Images, *Artificial Intelligence*, Vol. 17, 1981, pp. 285—348.
20. Requicha, A. A. G., Representation of Rigid Solids: Theory, Methods, and Systems, *Computing Surveys*, Vol. 12, No. 4, December 1980, pp. 437—464.
21. Baer, A., Eastman, C., and Henrion, M., Geometric Modeling: A Survey, *Computer Aided Design*, Vol. 11, No. 5, September 1979, pp. 253—272.
22. Harmon, L. D., Automated Tactile Sensing, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 1, No. 2, Summer 1982, pp. 3—32.
23. Grossman, D. D. and Taylor, R. H., Interactive Generation of Object Models with a Manipulator, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-8, 9, September 1978, pp. 667—679.
24. Ambler, A. P. and Popplestone, R. J., Inferring the Positions of Bodies from Specified Spatial Relationships, *Artificial Intelligence*, Vol. 6, 1975, pp. 175—208.
25. Brooks, R. A., Symbolic error analysis and robot planning, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 1, No. 4, December 1982.
26. Finkel, R. A., Constructing and debugging manipulator programs, Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, AIM 284, August 1976.
27. Brooks, R. A., Solving the find-path problem by representing free space as generalized cones, Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, AI Memo 674, May 1982.
28. Brooks, R. A., Find-Path for a PUMA-class Robot, *American Association of Artificial Intelligence Conference*, Washington, D. C., August 1983.
29. Brooks, R. A. and Lozano-Pérez, T., A Subdivision Algorithm in Configuration Space for Findpath with Rotation, Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, AI Memo 684, December 1982 (also IJCAI-83 Proceedings).
30. Lozano-Pérez, T., Automatic planning of manipulator transfer movements, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-11, No. 10, 1981, pp. 681—689.
31. Lozano-Pérez, T., Spatial planning: a configuration space approach, *IEEE Transactions on Computers*, C-32, No. 2, February 1983.
32. Lozano-Pérez, T. and Wesley, M. A., An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles, *Communications of the ACM*, Vol. 22, No. 10, October 1979, pp. 560—570.
33. Schwartz, J. T. and Sharir, M., On the Piano Movers Problem I: The Case of a Two-Dimensional Rigid Polygonal Body Moving Amidst Polygonal Barriers, Department of Computer Science, Courant Institute of Mathematical Sciences, New York University, Report 39, October 1981.
34. Schwartz, J. T. and Sharir, M., On the Piano Movers Problem II: General Properties for Computing Topological Properties of Real Algebraic Manifolds, Department of Computer Science, Courant Institute of Mathematical Sciences, New York University, Repor t41, February 1982.
35. Udupa, S. M., Collision detection and avoidance in computer controller manipulators, *5th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Massachusetts Institute of Technology, 1977.
36. Udupa, S. M., Collision Detection and Avoidance in Computer Controller Manipulators, Ph. D. Thesis, Department of Electrical Engineering, California Institute of Technology, 1977.
37. Widdoes, C., A heuristic collision avoider for the Stanford robot arm (unpublished), Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, 1974.
38. Boyse, J. W., Interference detection among solids and surfaces, *Communications of the ACM*, Vol. 22, No. 1, 1979, pp. 3—9.

39. Pieper, D. L., The Kinematics of Manipulators under Computer Control, Ph. D. Thesis, Department of Computer Science, Stanford University, 1968.
40. Khatib, O., Commande dynamique dans l'espace operationnel des robots manipulatèurs en presence d'obstacles, Docteur Ingenieur Thesis, L'Ecole Nationale Superieure de l'Aeronautique et de l'Espace, Toulouse, France, 1980.
41. Symon, K. R., *Mechanics*, Addison Wesley, Reading, Massachusetts, 1971.
42. Scheinman, V. C., Design of a Computer Controlled Manipulator, Stanford Artificial Intelligence Laboratory, AIM 92, June 1969.
43. Warnock, J. E., A Hidden-Surface Algorithm for Computer Generated Halftone Pictures, Computer Science Department, University of Utah, 1969, TR4—15.
44. Laugier, C., *Proceedings of the 11th International Symposium on Industrial Robots*, Tokyo, Japan, October 1981.
45. Wingham, M., Planning how to grasp objects in a cluttered environment, M. Ph. Thesis, Edinburgh, 1977.
46. Paul, R. P., Modelling, trajectory calculation, and servoing of a computer controlled arm, Stanford University, Artificial Intelligence Laboratory, AIM 177, November 1972.
47. Brou, P., Implementation of High-Level Commands for Robots, M. S. Thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, December 1980.
48. Mason, M. T., Manipulator Grasping and Pushing Operations, Technical Report, Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1982.
49. Hanafusa, H. and Asada, H., Stable prehension of objects by the robot hand with elastic fingers, *Proceedings of the 7th International Symposium an Industrial Robots*, Tokyo, October 1977, pp. 361—368.
50. Mason, M. T., Compliance and force control for computer controlled manipulators, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-11, No. 6, 1981, pp. 418—432.
51. Inoue, H., Force feedback in precise assembly tasks, Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, AIM-308, Cambridge, August 1974.
52. Lewis, R. A., Autonomous manipulation on a robot: summary of manipulator software functions, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, TM 33—679, March 1974.
53. Myers, J. K. and Agin, G. J., A Supervisory Collision-Avoidance System for Robot Controllers, in *Robotics Research and Advanced Applications*, ASME, 1982.

Глава 23

ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ И РОБОТОТЕХНИКА

Д. Мики, Эдинбургский университет, г. Эдинбург, Шотландия

23.1. Введение

В течение последнего десятилетия развитие промышленных роботов осуществлялось в одном направлении: по пути создания программируемых манипуляторов, лишенных слуха, зрения и речи. Применение экспертных систем сдерживается отсутствием недорогих систем очувствления, пригодных для промышленной эксплуатации. По мере оснащения роботов телевизионными камерами, лазерными дальномерами, тактильными датчиками, микрофонами и другими средствами очувствления будет распространяться новая технология программирования с использованием правил. Через 10 лет самым современным роботом будет робот-эксперт с развитыми функциональными возможностями, хорошей реакцией, способный выполнять под управлением человека или в кооперации с другими роботами многие операции, сегодня недоступные для автоматизации. В этой главе рассматриваются некоторые возможности таких роботов и связанные с ними задачи.

Сразу за введением следует краткий обзор современной концепции экспертных систем (см. разд. 23.2). В разд. 23.3 ставится

задача использования зрительных датчиков, установленных на манипуляторах для случая взаимодействия нескольких роботов. Примеры демонстрируют функциональные возможности и способность к обучению зрительно очувствленных роботов, отличительные особенности, естественные для человека, которые считаются редко используемыми в управляющих программах для роботов. Современная теория искусственного интеллекта (ИИ) предоставляет удобства, позволяющие формализовать знания и процессы обучения.

Разд. 23.4 представляет собой ретроспективный обзор применения методов ИИ в робототехнике. В качестве иллюстраций описаны опыты, выполненные в лаборатории автора в Эдинбурге. Разд. 23.5 посвящен двусторонней речевой связи между роботом и оператором, а также между двумя роботами. В разд. 23.6 описываются возможности применения проблемно-ориентированных языков программирования задач ИИ в робототехнике, стратегия общего управления различными компонентами робота, оснащенными собственными микропроцессорами, посредством обмена сообщениями по локальной сети связи.

Разд. 23.7 посвящен вопросам обучения студентов и технического персонала программированию задач ИИ. Приводится минимальный перечень тем, которые могут составить основу курса робототехники. В разд. 23.8 обсуждаются возможности методики обучения показом и приводится пример описания индуктивного обучения стратегии перемещений.

Разд. 23.9 посвящен более подробному изложению выигрышных сторон речевого взаимодействия робота с оператором и с другими роботами, приводятся примеры. В разд. 23.10 анализируется пригодность сегодняшних методов разработки программного обеспечения на следующем этапе развития робототехники. Подчеркивается необходимость применения дружественного интерфейса пользователя с постоянно усложняющимися устройствами, что потребует коренных изменений.

23.2. Что такое экспертные системы?

Экспертная система — компонент программного обеспечения ЭВМ, в которой с помощью средств представления знаний хранятся сведения, полученные от экспертов в некоторой области. Форма представления знаний позволяет формировать на их основе последовательности действий или рекомендации, а также обосновывать их правильность пользователю. Существенной особенностью экспертных систем является возможность получения из хранящихся в системе в закодированном виде знаний в данной области научно обоснованных фактов и правил на естественном языке. Использование экспертных систем в таком режиме позволяет повысить достоверность источников знаний и говорить о повышении качества знаний.

Экспертная система *R1* фирмы «Диджитал экуипмент» используется для построения конфигурации вычислительных систем по запросам пользователя [1]. Уже сегодня она справляется с этим лучше, чем самый квалифицированный персонал фирмы. Но при повышении качества знаний главное внимание уделяется не основной функции экспертной системы — выдаче советов в режиме диалога с пользователем, а побочному продукту — законченной базе знаний. Язык экспертных систем используется для выполнения следующих функций: ввод знаний в ЭВМ; проверка знаний; заполнение пробелов в базе знаний; расширение базы знаний; изменение базы знаний.

В итоге, после программного преобразования на естественный язык знания могут предстать в измененном до неузнаваемости виде. Это было впервые отмечено при следующих обстоятельствах.

Иван Братко, югославский специалист по информатике и шахматист, во время пребывания в Эдинбурге выбрал для изучения небольшую часть шахматной теории, а именно: как поставить мат королю королем и ладьей в любой возможной начальной позиции. И хотя техника матования проста, задачу не так просто запрограммировать. Если не использовать методы искусственного интеллекта, на это потребуется от двух до трех месяцев работы. Более того, полученная в итоге программа редко бывает правильной.

Используя один из предложенных в Эдинбурге языков, Братко завершил работы по программированию за две недели. Более того, он доказал исчерпывающим перебором и аналитически, что программа обладает полнотой и работает правильно. Затем правила были переведены обратно на английский язык. В результате получился набор из всего лишь шести правил, но он был полным и верным в отличие от правил, закодированных гроссмейстером, которые содержали ошибки в подвергшихся избыточным проверкам случаях [2—4] и, более того, были далеки от полноты.

Такое улучшение в представлении знаний в результате обратной трансляции программы было неожиданно. Однако, когда на эти возможности было обращено внимание сотрудников других лабораторий, они сообщили, что имели возможность наблюдать аналогичное явление. Например, разработанная в лаборатории Фейгенбаума система МИЦИН была первой экспертной системой нового типа [5]. И хотя заложенные в нее знания не обладают полнотой, достаточной для оказания помощи врачам из клиники, системой активно пользуются студенты медицинского института, которые считают, что база знаний более полна и проста в обращении, чем учебник. Ниже описываются другие случаи, когда в результате обратной трансляции программ были получены улучшенные правила на естественном языке.

23.2.1. *Клиническая медицина*

Экспертная система по клинической медицине является результатом сотрудничества доктора Майерса, обладающего колоссальным авторитетом в этой области, и специалиста по информатике Попла [6]. Они поставили цель формализовать клинический опыт Майерса в виде экспертной системы. Практикующие врачи уже сегодня используют фрагменты полученной базы знаний в качестве справочника.

23.2.2. *Химический органический синтез*

Химики-органики Калифорнийского университета пользуются базой знаний по органическому синтезу *SECS*, разработанной Уипки [7]. В спорных случаях информация, хранящаяся в этой базе знаний, считается наиболее достоверной.

Еще более интересные результаты достигаются при использовании систем со средствами самообучения. Пользуясь такими программами, эксперт может передавать свои знания системе на примерах, не прибегая к непосредственному программированию. Следующие два примера относятся к этой категории систем.

23.2.3. *Патологии сои*

До недавнего времени лучшая классификация болезней сои принадлежала фитопатологу доктору Якобсену. Он был привлечен к совместным исследованиям под руководством Михалски в университете штата Иллинойс [8]. Программа Михалски (*AQ11*) может обобщать знания, представленные в виде примеров: таким образом, в этом случае ЭВМ можно считать соавтором полученной классификации, которая позволяет ставить 99 % правильных диагнозов заболеваний растений (против примерно 83 %, получаемых по старой системе Якобсена). Затратив большие усилия, используя ЭВМ для тестирования, перестройки и отладки своей теории, Якобсен улучшил собственную систему классификации и достиг в результате уровня 93 % правильной классификации. Признав дальнейшие усилия бесплодными, он решил принять вариант, построенный ЭВМ.

23.2.4. *Масс-спектроскопия*

Этой отрасли знаний посвящена система ДЕНДРАЛ, разработанная в Стэнфордском исследовательском институте. Индуктивный обучающий модуль программы Мета-ДЕНДРАЛ порождает ранее не существовавшие правила для определения масс-спектров семейства органических соединений, известных как моно- или поликетоандростины. Эти правила легли в основу появившейся позднее химической публикации [9].

Возникает вопрос: следует ли составлять отдельные программы для каждой из этих областей применения? Безусловно, вводимые экспертом знания должны принадлежать определенной области, но индуктивная программа, помогающая ввести эти знания, может быть универсальной. Это подтверждается следующим примером.

23.2.5. *Рак лимфатических желез*

Для диагностирования рака лимфатических желез Братко успешно использовал разработанную в Эдинбурге обучающую программу Куинлана *ID3*, которая, в свою очередь, базируется на разработанной в 1960 г. Хантом системе *CLS* (концептуальная обучающая система). Эдинбургская диалоговая программа *ID3* разрабатывалась с использованием базы шахматных знаний. Стратегия шахматной игры в эндшпиле задавалась на примерах. Полученная в результате полная и корректная теория игры короля и пешки против короля сама по себе интересна для шахматистов. Затем в содружестве с врачом Братко использовал ту же самую программу для построения схемы диагностики раковых заболеваний лимфатических желез. В этой разработке использовались знания из историй болезней. С помощью построенной базы знаний Братко смог давать медицинские консультации, хотя и не имел медицинского образования [10].

Попробуем определить, как перечисленные выше принципы используются в робототехнике. Для этого следует уяснить, что планирование и выполнение последовательности сборочных операций роботом с подсистемой зрительного очувствления требуют неявного использования знаний о системах

манипулятор — зрительный датчик. Впрочем, оператор системы может и не знать этого. Главной задачей разработчика робототехнической экспертной системы является представление таких «скрытых» знаний в виде совокупности правил, и перевод их в форму, пригодную для использования в системе управления сборкой.

23.3. Экспертные системы и роботы со зрительным очувствлением

Как уже отмечалось, существует предубеждение, что для планирования повседневной производственной операции никогда не может понадобиться квалификация и опыт такого уровня, как у профессора-медика или гроссмейстера. Двигательные навыки (как и любые другие, в том числе и навык умственной работы) приобретаются только с продолжительным опытом. Привычка согласовывать свои действия с видимой обстановкой вырабатывается у человека в первые годы жизни. Однако все сложности, которые мы испытываем в первые пять лет жизни, легко забываются, и взрослый человек так же легко согласовывает свои действия с тем, что видит, как гроссмейстер играет блиц, не задумываясь, интуитивно.

В дополнение к сказанному приведем две классификации операций по сложности: а) может быть быстро выполнена кем угодно от семилетнего ребенка до специалиста; б) может быть выполнена современным роботом; в) сможет выполняться роботами в 80-х годах при условии дальнейшего развития стандартного программного обеспечения, использующего базы знаний. Чтобы не возникало предположения, что достичь этого будет легко, приведем примерную шкалу оценки затрат, необходимых для реализации той или иной операции.

Что следует продемонстрировать. Недорогую роботизированную систему на микропроцессорах, которой можно объяснить задание словами или рисунками и которая затем сможет определить алгоритм выполнения задания и выполнить его в кооперации с другими роботами или под управлением человека (если это требуется).

Простое задание. Сортировка и раскладка отдельных объектов на ограниченной поверхности, удовлетворяющие некоторым заданным отношениям, с выявлением ошибок и выполнением перестановок, как, например, при сервировке стола или при раскладывании набора инструментов на верстаке.

Более сложное задание. Использование библиотеки типовых инженерных приемов для построения и проверки моделей по эскизам, также с кооперацией нескольких роботов.

Оценки трудоемкости. Для простого задания — 10 человеко-лет в течение трех лет. Для более сложного задания — 70 человеко-лет в течение пяти лет.

И хотя по академическим нормам эти затраты значительны, они сравнительно малы по сравнению со средствами, затрачиваемыми на исследования и развитие большинством ведущих машиностроительных фирм.

23.4. Из истории машинного интеллекта

Эпоха наиболее интенсивных экспериментов по искусственному интеллекту в робототехнике (в отличие от традиционной промышленной техники) приходится на конец 60-х начало 70-х годов.

23.4.1. Проект ШЕЙКИ Стэнфордского исследовательского университета

Проект ШЕЙКИ, начатый Розеном в Стэнфордском исследовательском институте, оказал заметное влияние на методологию программирования роботов. ШЕЙКИ представлял собой подвижный робот на колесиках, размером с человека, снабженный дальномером, камерой и другими датчиками. Предлагаемые ему задания предполагали автоматическое составление развернутого плана действий. Например, такая команда, как «Пойди в комнату *B*, найди ящик, толкай его до стены, вернись обратно», может быть реализована только в результате расчета модели внешней среды, включающей в себя логические и геометрические ограничения, описывающие окружающую обстановку и причинные связи. Группа Стэнфордского исследовательского института выбрала в качестве формы представления язык элементарной логики, по которому каждое состояние в пространстве описывается последовательностью предикатов вида «В (РОБОТ,А), ПЕРЕМЕЩАЕМЫЙ (ЯЩИК1)» и т. д. Планирование осуществлялось методом эвристического поиска по графу задачи, узлам которого соответствовали логические описания (см. ниже), а дугам — действия, такие, как ТОЛКАТЬ, ИДТИ и СТОП. С каждым действия связан список изменений, указывающий, какие предикаты должны быть добавлены или удалены из текущего описания, чтобы получить новое описание окружающей среды после пробного осуществления данного действия. Например, с действием идти (*X*, *Y*) будет связан список, предписывающий удалить предикат В (РОБОТ, *X*) и добавить В (РОБОТ, *Y*). Кроме того, с действиями были связаны и проверки на возможность их осуществления, например, перед определением результата действия ТОЛКАТЬ (*X*, *Y*) проводится проверка истинности предиката ПЕРЕМЕЩАЕМЫЙ (*X*).

Значение опытов с ШЕЙКИ остается актуальным и сегодня, и может быть обобщено следующим образом: а) использование аппарата формальной логики указало путь дальнейшему развитию логического программирования, первым результатом которого явилось создание языка программирования ПРОЛОГ; б) использование эвристического поиска в пространстве возможных состояний окружающего мира позволило сформулировать научно обоснованную концепцию, адекватную нуждам автоматизации планирования действия робота.

23.4.2. Эдинбургский проект ФРЕДДИ

В разработанном параллельно с ШЕЙКИ Эдинбургском проекте ФРЕДДИ были реализованы дополнительные возможности, связанные с формированием описаний объектов по данным системы технического зрения [11]. Разработчики ФРЕДДИ хотели сделать его быстрообучаемым (несколько дней работы квалифицированного специалиста). Обучение сводилось к заданию названий новых деталей при сборке и их внешнего вида, а также порядка сборки из них простой деревянной игрушки. Роботу, снабженному двумя телекамерами, манипуляторами с датчиками касания и подвижной платформой, была поставлена задача разобрать беспорядочную кучу деталей, распознать их, классифицировать и расставить их в заданные места на платформе. Следующий этап (собственно процесс сборки) выполнялся вслепую. Следовательно, методика ИИ в основном применялась на первом этапе, при взаимодействии с системой технического зрения. Использовались следующие основные приемы.

Для ускорения построения ключевых обучающих процедур широко использовалось программируемое запоминающее функциональное устройство.

В качестве формы представления как описаний образов отдельных объектов, так и для описания всей совокупности предметов на платформе был опробован и усовершенствован аппарат графов связей (сейчас они обычно называются семантическими сетями).

Проводилась разработка эффективных алгоритмов выполнения манипуляций и обработки графов описаний.

Как и в случае с ШЕЙКИ, был продемонстрирован подход к робототехнике, свободный от недостатков роботов первого поколения, особенностью которого является интеграция различных подсистем очувствления и исполнительных органов. Эта же идея дала толчок аналогичным разработкам, выполненным в Массачусетском технологическом и Стэнфордском институтах.

Любопытно отметить, что в начале 70-х годов упомянутые роботы ШЕЙКИ И ФРЕДДИ продемонстрировали такие функциональные возможности, что и в 80-х годах ни одна лаборатория в мире не смогла достичь их уровня, несмотря на то что потребности в этом постоянно нарастали. Объяснение этому напоминает сказку про гусыню, которая несла золотые яйца. Читатель помнит, что в надежде приобрести несметные богатства нетерпеливый фермер убил волшебную гусыню. Так и в 1973 г. равнодушные к исследовательской части работ по ИИ, нетерпеливые финансисты Англии и Америки вынесли приговор этим экспериментальным проектам роботов: «Технология или смерть!» Проекты ФРЕДДИ и ШЕЙКИ умерли. Занятые в них специалисты по электронике, управлению и эксплуатации ушли в производство. А ученые, специалисты по ИИ, перебросили свои силы на решение других задач из этой области — представление знаний, планирования и обучения.

23.4.3. Последующие работы

Хотя после 1973 г. в области ИИ робототехнических систем работы почти не проводились, многое было сделано в смежных областях. Поэтому и в истории этих работ за рассматриваемый период отмечается деятельность лишь нескольких человек. Как говорилось ранее, методы ИИ впервые были применены в робототехнике в начале 70-х годов в СИИ, МТИ, Стэнфордском университете и в Эдинбурге. Сотрудники лаборатории в Эдинбурге в основном занимались изучением способов параллельной обработки массивов при распознавании образов и применением алгоритмов индуктивного обучения для машинного представления правил распознавания. Еще раньше (см. далее) был проведен ряд экспериментов по применению манипулятора с простейшей системой технического зрения с использованием методики индуктивного обучения выполнению действий в определенной обстановке.

Для распознавания образов применялось логическое устройство *CLIP* [12—22], моделирующее клеточный автомат. В результате этих работ эффективность системы технического зрения была повышена как минимум на три порядка. Еще раньше предварительные эксперименты выявили группу робототехнических операций в принципе выполнимых, но требующих использования средств обработки знаний в полном объеме. Задания такого рода называются манипуляциями в заданной обстановке. Человек впервые сталкивается с подобными заданиями в детстве, когда в детской комнате на некоторой поверхности составляет различные комбинации, расставляя и передвигая вырезанные картинки, изображающие предметы. Промышленным аналогом этой операции может служить, например, работа робота по упаковке различных предметов в ячейки. Такой робот должен быть обучаемым (включая обучение на примерах), чтобы визуально распознать отдельные объекты и интерпретировать их комбинацию сначала по принципу «подходит» или «не подходит», а затем на лучшее или худшее соответствие упаковке. В ходе интерпретации происходит распознавание на несоответствие по особым признакам и на основании этого рассматриваются и отрабатываются манипулятором корректирующие действия. Последняя операция аналогична проведению терапевтической диагностики с разносторонним использованием экспертных систем.

Для предоставления сведений, необходимых для работы робота, методология логического программирования (разработанная в Эдинбурге Ковальским [23]) предлагает математически обоснованные и эффективные при программировании ЭВМ формализмы. Для практического создания недорогих систем с взаимодействием манипулятора и системы технического зрения была сделана хорошая реализация ПОЛОГа на микроЭВМ фирмы ИБМ Кларком и МакКабе [38] в Императорском колледже в Лондоне. В этой современной реализации ПРОЛОГа заложены соответствующие возможности для выполнения числовых операций. Группа, руководимая автором этой статьи, продемонстрировала возможности индуктивного построения управляющих программ для работы на основе реализованной на ПАСКАЛе усовершенствованной программы Квинлана *ID3* [24—26]. Если в качестве выходного языка индукционной системы выбран ПРОЛОГ, то в одной программе могут быть реализованы как индуктивные, так и дедуктивные возможности. Пример использования правил индукции для распознавания образов приведен в разд. 23.8.

23.5. Взаимодействие человека с роботом и робота с роботом

Теперь рассмотрим вопросы проектирования взаимодействия и управления несколькими роботами. Вопросам разработки программного обеспечения и ИИ для совместной работы цеховых роботов придается такое большое значение потому, что при успешном их разрешении можно будет некоторое время пожинать плоды победы над конкурентами. Успешное решение этих проблем в контексте взаимодействия человек — машина [25, 26] поможет построить модель восприятия мира человеком и на ее основе создать эффективные системы взаимодействия человека с роботом и роботов друг с другом. Для более детального рассмотрения этого вопроса сначала обсудим конкретные вопросы речевого и зрительного ввода-вывода информации. Затем рассмотрим один из возможных подходов к вопросам планирования на основе использования объектно-ориентированных языков программирования.

Проведенные в Эдинбурге работы показали, что одна команда, поданная роботу голосом, вместо обычного задания последовательности действий с клавиатуры практически удваивает скорость задания новой траектории. Основная причина этого заключается в том, что при управлении с помощью клавиатуры следует сначала, при выдаче команды, посмотреть на клавиатуру, затем — на робота, чтобы удостовериться в выполнении команды, затем снова на клавиатуру и т. д. Пользуясь микрофоном, оператор может постоянно наблюдать за роботом.

Еще не всеми признано, что в недалеком будущем для управления кооперирующейся группой роботов речевой ввод информации будет сочетаться с речевым выводом и обмен сообщениями между роботами может также проводиться в воспринимаемом человеком виде. Такой метод позволяет сэкономить на интерфейсных устройствах, связывающих робототехническую систему воедино, облегчить работу обслуживающего персонала, лишенного возможности следить за обменом информацией в системе на чувственном уровне.

Ниже приводится краткое описание экспериментов, проведенных на простейшем оборудовании в лаборатории автора. Пользователь имеет возможность продублировать голосом в качестве дополнительного канала ввода любую команду, задаваемую переключением «обучающего» ключа. Выданную команду можно отменить или изменить по любому каналу. Таким образом, команда с клавиатуры может быть изменена речевой коррекцией, а речевая команда может быть изменена переключением ключа. В обоих случаях это производится после нажатия клавиши прерывания на клавиатуре. Чтобы задать словарь команд, пользователь должен повторить несколько раз в микрофон выбранное командное слово. Изготовителями роботов поставляется некоторый первоначальный словарь командных слов для обучения манипулятора движению по траектории. Пользователь может создать и хранить дополнительный словарь синонимов. Он также может использовать несколько речевых значений для одной и той же команды, т. е. например, для команды поднятия захвата он может использовать два речевых эквивалента: «вверх» и «выше». ЭВМ на экране дисплея или с помощью своего речевого синтезатора повторит, как будет интерпретирована речевая команда. Режим звукового повторения команды может быть включен или выключен по желанию пользователя. В режиме с подтверждением команда не будет выполнена без получения сигнала с клавиатуры или речевого сигнала об ее подтверждении или отмене.

Что касается упомянутого выше выбора словарей, то в обычных условиях используя стандартные программы распознавания было получено в среднем 14 верных распознаваний на каждые 15 произнесенных слов. Распознавание зависит от индивидуальных особенностей голоса пользователя. Другой пользователь должен настроить оборудование на себя, используя свои собственные словари, которые сохраняются для дальнейшего использования. Использование «чужого» словаря не имеет смысла.

Важное направление будущих исследований определяется тем, что, даже используя стандартные пакеты программ распознавания иевысокой точности, можно добиться безошибочного распознавания речевых команд, если эти команды будут произноситься стандартным речевым синтезатором робота. Это объясняется тем, что исключаются различные варианты произношения одних и тех же слов. Если одно и то же слово повторяет человек, то происходят значительные отклонения тонов, на что распознающее устройство может отреагировать непредсказуемым образом.

На первый взгляд идея использования речи в качестве основы для взаимодействия между роботами кажется неперспективной и даже странной. Но по сравнению с традиционными методами организации интерфейса ее преимущества очевидны для пользователя.

23.5.1. Снижение затрат на организацию взаимодействия

Прежде всего отметим, что затраты на построение традиционного программного и аппаратного обеспечения интерфейсов снижаются. Учитывая то, что предполагается связать первоначально несовместимые устройства, затраты на построение такого интерфейса традиционными способами могут быть огромными. При организации речевого интерфейса, каждому роботу потребуется только знать словари команд любого другого робота. Такие словари обычно содержат 10—20 командных слов. Предположением, что шум окружающей среды может исказить речевой интерфейс, можно пренебречь. Для связи в прямом направлении можно поместить динамик робота *A* и микрофон робота *B* в звуконепроницаемую коробку, установив снаружи контрольный динамик. Аналогично для осуществления обратной связи в направлении от *B* к *A* объединяются динамик робота *B* и микрофон робота *A*.

23.5.2. Упрощение работы персонала

Другое серьезное преимущество вытекает из сложности обслуживания роботов и управления ими. Даже для сегодняшнего поколения «неинтеллектных» устройств со стандартными функциями затраты на управление несколькими роботами в реальном времени могут быть существенными. Рассмотрим действия, вызванные сигналами с датчиков, усложненные передачей сообщений между взаимодействующими роботами. Если сигналы связи приходят по неречевым каналам (по проводам или с помощью радиосвязи) и не воспринимаются человеком, осуществляющим управление, контролировать окружающую обстановку и определять момент возникновения и причину неисправности становится очень сложно. С другой стороны, за речевыми командами легко следить, при этом легче «держать в голове» информацию о том, на какой стадии выполнения находится сейчас задание, кому передано управление и в чем причина прерывания. Более того, в некоторых случаях человек, осуществляющий управление, может изменить ситуацию по своей собственной речевой команде. Ниже (см. разд. 23.9) описываются эксперименты Крофта в Эдинбурге, в которых впервые на практике был применен этот способ управления.

23.6. Планирование действий объектно-ориентированных роботов

Берущее начало от формального описания фигурантов Карла Хевитта [27] направление в программировании привело к созданию языков программирования с идеологией, отличной от общепринятой идеологии процедурных языков. Вместо процедур используются фигуранты и объекты, поведение и свойства которых описывается в терминах получаемых ими сообщений. Кроме того, поведение определяется еще и тем, какие сообщения выдаются другим объектам. Ниже приводится фрагмент описания действий робота на языке РОСС.

Рассмотрим действия в рамках концепции построения и проверки гипотез, согласно которой каждое планируемое действие первоначально проверяется на модели, чтобы оценить его результаты, последствия и выполнимость. Это характерно для человека, планирующего свои действия. В большинстве случаев человек сначала их продумывает, а затем выполняет. Решение этой задачи осуществлялось в двух направлениях: 1) с использованием метода поиска наилучшего соседнего графа (система «Граф траверсер» [28]); 2) с использованием доказательств теорем в форме, характерной для системы СТРИПС [29].

Оба эти метода лежат в основе современных способов решения этой проблемы. Однако эти методы трудны для понимания и имеют невысокое познавательное значение. Во многих областях эта задача успешно решается на распределенном вычислительном оборудовании [33]. Примером может служить робототехника, в которой одно из направлений современных исследований посвящено взаимодействию манипуляторов. Приведенный ниже сценарий был разработан совместно с Чаном в Иллинойсском университете.

Используем для решения задачи на распределенном оборудовании (занятые сборкой многогранников взаимодействующие манипуляторы) метод предположений и проверок. Процесс сборки описывается сложными заданиями с использованием структур, аналогичных тем, что применяются в системе БИЛД [30].

Полученное задание передается планировщику (рис. 23.1), который строит первичную последовательность основных действий. Затем эти действия разделяются между манипуляторами по принципу распределения контрактов [37]. При получении задания процессов манипулятор планирует соответствующие действия. Затем эти действия воспроизводятся на модели окружающей среды с использованием речевого обмена сообщениями. С помощью моделирования удается определить результат, последствия и выполнимость этих действий. По результатам моделирования вносятся необходимые поправки. Информация о частях задания, требующих кооперированных действий, передается другим манипуляторам. Такой способ планирования и управления более привычен для человека, чем алгоритмы поиска по графу системы «траверсер» или доказательства логических теорем в системе СТРИПС. Во многих случаях такое планирование действий аналогично человеческому поведению.

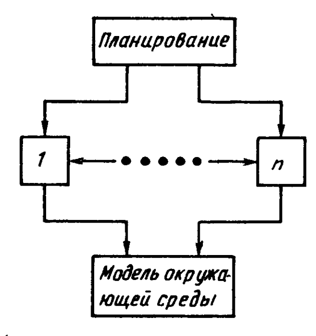


Рис. 23.1. Общая схема метода предположений и проверок на распределенном оборудовании

Модель окружающей среды содержит набор источников знаний (фигурантов), каждый из которых соответствует одному конкретному объекту. Знания делятся на статические и динамические и могут быть представлены либо в информационном, либо в процедурном виде. Чтобы не усложнять работу процессора манипулятора учетом ограничений, можно рассматривать ограничения или начальные условия в качестве составной части модели поведения объектов. Такая модель окружающей среды может быть определена по классификации Дюрана, как «причинно-следственная перцептуальная модель» [32].

23.6.1. *Достоинства*

Прежде всего система позволяет изучить ситуации, возникающие в связанных системах (например, взаимную блокировку). Система обладает свойствами гибкости и модульности, так как «с ее точки зрения» добавление нового манипулятора или объекта представляет собой появление в модели окружающей среды нового источника знаний (фигуранта).

Поскольку управление осуществляется речевыми командами, действия системы хорошо понятны человеку. Это имеет очень большое значение. Применимость и широкое использование любой сложной системы принятия решений в большой степени зависят от полноты понимания человеком процесса получения результата.

Современные модели окружающей среды объединены для упрощения моделирования. Однако декомпозиция такой модели по отдельным манипуляторам не представляет сложности. Каждому манипулятору в произвольный момент времени для выполнения определенного задания требуется информация лишь о части общей модели. Это дает возможность направлять информацию с датчиков только тем процессорам, которым она требуется. Дополнительные знания могут быть получены по запросу к общей модели окружающей среды [33]. Отделение средств управления системой от описания предметной области обеспечивает ее инвариантность по отношению к последней. Для перенастройки системы на другую предметную область достаточно заменить модель окружающей среды.

23.6.2. *Языковые средства*

Для описания распределенной системы более всего подходят объектно-ориентированные языки программирования типа РОСС [34]. На языке РОСС все процессы описываются в форме обмена сообщениями между наборами объектов или фигурантами. Язык удобен для описания или моделирования реальных динамических систем, сложность которых делает невозможным использование других аналитических средств.

23.6.3. *Возможный сценарий*

На рис. 23.2 проиллюстрирован возможный сценарий, а ниже приводится символическая запись стадии планирования:

ЛЬЗОВАТЕЛЬ: Запросить ПЛАНИРОВЩИК поменять местами блоки B и C.

ЛАНИРОВЩИК: Запросить манипулятор 1 перенести блок B в положение блока C. Запросить МАНИПУЛЯТОР 2 перенести блок C в положение блока B.

МАНИПУЛЯТОР 1: Передать СИСТЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ план захвата блока B.

СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ: Передать МАНИПУЛЯТОРУ 1 подтверждение выполнения.

МАНИПУЛЯТОР 1: Запросить ПЛАНИРОВЩИК запомнить план (захват МАНИПУЛЯТОРОМ 1 блока B).

МАНИПУЛЯТОР 2: Сообщить СИСТЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ план захвата блока C.

СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ: Передать МАНИПУЛЯТОРУ 2, что блок D находится на блоке C.

МАНИПУЛЯТОР 2: Передать СИСТЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ план захвата блока D. Запросить ПЛАНИРОВЩИК запомнить перемещение блока D.

СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ: Подтвердить МАНИПУЛЯТОРУ 2 выполнение.

МАНИПУЛЯТОР 2: Запросить ПЛАНИРОВЩИК запомнить план (захват МАНИПУЛЯТОРОМ 2 блока D).

МАНИПУЛЯТОР 1: Передать СИСТЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ план перемещения блока B в положение C.

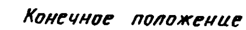
СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ: Сообщить МАНИПУЛЯТОРУ 1, что место занято.

МАНИПУЛЯТОР 1: Запросить ДРУГИЕ МАНИПУЛЯТОРЫ переместить блок C.

МАНИПУЛЯТОР 2: Передать МАНИПУЛЯТОРУ 1 подтверждение.

Начальное положение

B
A
D
C



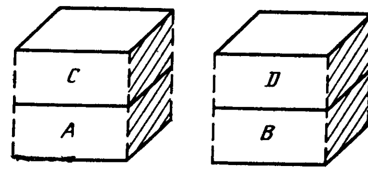


Рис. 23.2. Возможный сценарий планирования действий объектно-ориентированного робота

МАНИПУЛЯТОР 1: Запросить ПЛАНИРОВЩИК запомнить план (МАНИПУЛЯТОР 1 ожидает перемещения блока *C* МАНИПУЛЯТОРОМ 2).

МАНИПУЛЯТОР 2: Передать СИСТЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ план перемещения блока *D* на другое место.

СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ: Передать МАНИПУЛЯТОРУ 2 подтверждение.

МАНИПУЛЯТОР 2: Запросить ПЛАНИРОВЩИК запомнить план (МАНИПУЛЯТОР 2 снимает блок *D*).

МАНИПУЛЯТОР 2: Передать СИСТЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ план захвата блока *C*.

СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ: Подтвердить МАНИПУЛЯТОРУ 2 выполнение.

МАНИПУЛЯТОР 2: Запросить ПЛАНИРОВЩИК запомнить план (захват блока *C* МАНИПУЛЯТОРОМ 2). Передать МАНИПУЛЯТОРУ 1, что блок *C* перемещен.

МАНИПУЛЯТОР 1: Передать СИСТЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ план перемещения блока *B* в положение *C*.

СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ: Подтвердить МАНИПУЛЯТОРУ 1 выполнение.

МАНИПУЛЯТОР 1: Запросить ПЛАНИРОВЩИК запомнить план (МАНИПУЛЯТОР 1 снимает блок *B* и перемещает его на прежнее место блока *C*).

МАНИПУЛЯТОР 2: Передать СИСТЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ план перемещения блока *C* на прежнее место блока *B*.

СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ: Подтвердить выполнение МАНИПУЛЯТОРУ 2.

МАНИПУЛЯТОР 2: Запросить планировщик запомнить план (МАНИПУЛЯТОР 2 перемещает блок *C* на место блока *B*).

ПЛАНИРОВЩИК: Запросить МАНИПУЛЯТОР 1 захватить блок *D*.

МАНИПУЛЯТОР 1: Подтвердить ПЛАНИРОВЩИКУ выполнение.

ПЛАНИРОВЩИК: Запомнить план (МАНИПУЛЯТОР 1 захватил блок *D*).

ПЛАНИРОВЩИК: Запросить МАНИПУЛЯТОР 1 поместить блок *D* на блок *B*.

МАНИПУЛЯТОР 1: Подтвердить ПЛАНИРОВЩИКУ выполнение.

ПЛАНИРОВЩИК: Запомнить план (МАНИПУЛЯТОР 1 поместил блок *D* на блок *B*). Запомнить план (конец).

ПОЛЬЗОВАТЕЛЬ Запросить у планировщика окончательный план.

ПЛАНИРОВЩИК: Окончательный план.

МАНИПУЛЯТОР 1	МАНИПУЛЯТОР 2
захват блока *B*	захват блока *D*
ожидание перемещения МАНИПУЛЯТОР 2 блока *C*	снятие блока *D*
	захват блока *C*
	установка блока *C* на прежнее положение блока *B*
установка блока *B* на прежнее положение блока *C*	
захват блока *D*	
установка блока *D* на блок *B*	

23.6.4. *Ограничения*

Поскольку глава посвящена планированию действий робота, вопросы управления движением его манипулятора носят второстепенный характер и не рассматриваются подробно. Устройство управления движением выполняет расчеты траекторий, преобразования координат и т. д., и можно считать его отдельным модулем в общей системе. Это оправдано еще и тем, что управление движением манипулятора зависит от типа манипулятора. Кроме этого, существуют и другие вопросы, требующие более тщательного рассмотрения. Один из них — это задача моделирования действий в пустом пространстве [30], исследование которой находится в самой начальной стадии.

23.7. Необходимость средств практического обучения

В настоящее время обучение программированию роботов производится всего лишь в нескольких центрах, но необходимость такого обучения в развитых странах будет расти. Отсутствие обучающего программного обеспечения явно не соответствует количеству дорогостоящих промышленных робототехнических систем, установленных на различных предприятиях. Более того, даже система производственного обучения ориентируется сегодня на наиболее широко распространенное оборудование первого поколения, а не на оборудование второго и третьего поколений, которое появится на производстве, когда обучение персонала будет закончено.

Средства совершенствования обучения имеются уже сейчас. Вполне реалистичным представляется проект создания достаточно сложного, но эффективного тренажера, работая на котором, можно было бы приобрести навыки использования экспертной системы для программирования роботов с подсистемами очувствления. Такой тренажер будет стоить примерно 10 тыс. долл. Рассматривается возможность создания локальной сети на основе персональной ЭВМ фирмы ИБМ или ее аналогов. По мнению автора, все перечисленные возможности уже проверяли в том или ином учебном заведении.

23.7.1. *Интеллектуальный тренажер по робототехнике*

Разработанные независимо в различных академических исследовательских лабораториях новые программные средства и технологии необходимо объединить в недорогом универсальном рабочем месте программиста-робототехника. Такое средство должно обеспечивать следующие возможности:

а) введение в систему информации об объектах, отношениях между ними и логике их взаимодействия;

б) автоматическое построение представленных на процедурном языке результатов работы логической системы (например, при составлении плана перемещений может потребоваться процедура поиска кратчайшего пути или другая оптимизация);

в) автономное построение планов в форме правил, обеспечивающих достижение задаваемых пользователем целей и подцелей. Сохранение структуры логических выводов и вывод ее на видеотерминал для корректировки построенных планов;

г) средства индукции на базе ЭВМ, позволяющие пользователю вводить в систему новые планы, задавая примеры и контрпримеры связей типа ситуация — действие;

д) эвристическая модель отладки планов. Подобную экспертную систему невозможно построить без участия специалиста в предметной области в качестве источника знаний. Студенты вначале должны стать специалистами в данной области, пройдя интенсивное обучение с помощью систем, перечисленных в пунктах а—г;

е) обобщение перечисленного выше на случай взаимодействия нескольких роботов.

Для изучения могут быть предложены следующие темы: выполнение манипуляций на стенде и принятие решений на основании зрительной информации, построение планов, индукция и осуществление простых стратегий перемещений, элементарное распознавание образов и методы обработки и сопоставления информации, полученной от различных датчиков.

23.8. Обучение роботов на примерах

При наличии режима обучения робот должен воспринимать информацию, представленную в наиболее удобной форме. Простой и естественной формой является удачно подобранная последовательность примеров. По этим примерам робот должен построить набор правил. В алгоритмах технического зрения и «обучения показом» используются другие форматы представления информации. В последнее время в качестве вспомогательных средств генерации правил для экспертных систем разрабатываются индукционные вычислительные программы. Ниже приводится описание типовой индукционной программы.

Программа *ACLS* (моделирующая обучающая система) на основании примеров генерирует правила (классифицирующие или управляющие действиями) методом индукции. Обучающий набор примеров передается программе *ACLS* в виде последовательности записей. Все поля записи, кроме последнего, заполнены значениями атрибутов в соответствии с классификацией пользователя (элементарные атрибуты). В последнее поле заносится имя класса решений, к которому относится запись (например, КРУГ, ЭЛЛИПС, ТРЕУГОЛЬНИК, КВАДРАТ, МНОГОУГОЛЬНИК, ДРУГИЕ; или ВРЕДНЫЙ, БЕЗВРЕДНЫЙ, МНИМЫЙ; или РАЗРЕШЕННЫЙ, НЕРАЗРЕШЕННЫЙ, ОСОБЫЙ или просто ИСТИНА, ЛОЖЬ). На основании этих записей *ACLS* формирует правила классификации в виде дерева решений, ветвления которого соответствуют значениям атрибутов. Программа *ACLS* формирует также эквивалент-

ное дереву решений условное логическое выражение на языке ПАСКАЛЬ, которое может затем использоваться для классификации новых примеров. Если очередной пример не отвечает текущему правилу, программа может переформировать правило в соответствии с новыми условиями и отобразить, запомнить или напечатать его.

Достаточный для классификации данных набор атрибутов формируется экспертом в прикладной области. При формировании набора атрибутов следуют правилу: если есть мнение, что атрибут целесообразен, то следует включать его в набор. Если в действительности атрибут не существен, то он не обрабатывается программой *ACLS* и не включается в формируемое дерево (и соответствующее выражение на ПАСКАЛе). При выполнении конкретного задания эксперту не обязательно иметь четкое представление о правилах. Эксперт должен составить список атрибутов и произвести для конкретных примеров классификацию так, как он считает правильным. *ACLS* следит за поведением эксперта при классификации и на основании этого, используя введенные атрибуты, строит простейшие правила, которые позволяют выполнить точно такую же классификацию. С расширением обучающего набора за счет добавления новых примеров, генерируемые программой *ACLS* правила становятся более точными. И в какой-то момент этого процесса эксперт сможет заметить: «Мне кажется, что это сделал я сам». Таким образом эксперт передает машине свои правила принятия решений, не располагая их точной формулировкой. Это обстоятельство приближает пользователя к возможности построения своей собственной экспертной системы.

23.8.1. Составление плана действий робота для случая простой конфигурации рабочей среды

Как правило, современные робототехнические системы имеют несовершенные средства обучения. Они работают по заранее четко сформулированной последовательности перемещений. Это вполне годится для точечной сварки в автомобилестроении, когда производится сборка одной модели автомобиля. Но этого явно не достаточно для выполнения, например, сборочных операций на конвейере, когда детали расположены в произвольном порядке. В этом случае желательно, чтобы робот мог обучаться на примерах. Тогда ему можно было бы показать, как следует производить сборку при различных вариантах расположения деталей. Тогда на основе этих примеров были бы сформулированы правила, которые можно использовать при составлении плана действий робота при различных начальных или промежуточных размещениях деталей.

Как уже отмечалось программа *ACLS* реализует обучение на примерах. Каждый пример состоит из двух частей: списка отличительных признаков ситуации (значения атрибутов) и типа ситуации (имя класса). Приведем фантастический пример: роботу предлагается набор описаний ситуаций, в которых надо воспользоваться зонтиком, и другой набор, когда зонтик не нужен. На этих примерах с помощью программы *ACLS* робот сможет научиться пользоваться зонтиком. Примеры состоят из списка значений атрибутов (например, идет дождь, ты не промок, ты находишься на улице), связанных с именем класса принятия решений (например, «пользоваться» или «не пользоваться»).

После ввода достаточного количества примеров *ACLS* формирует правила, обобщающие их. Ниже рассматривается процесс обработки правил в ЭВМ.

Человек, изучив некоторую предметную область, способен классифицировать принадлежащие ей объекты по категориям. Для этого ему требуется некоторое правило классификации. Он может пользоваться этим правилом даже в тех случаях, когда не может четко его сформулировать. В памяти ЭВМ правило классификации должно быть представлено в виде программы. Например:

```
FUNCTION DECISION : DTYPE;
BEGIN
    CASE WEATHER OF
    BLUSTERY: DECISION := DONTUSE;
    DRY:      DECISION := DONTUSE;
    WET:      CASE INDOORS OF
              NO: DECISION := USE
              YES: DECISION := DON-
              TUSE
              END;
    END;
END;
```

Человек подсознательно распознает ситуации, в которых обстоятельства вынуждают воспользоваться зонтиком. Соответствующая программа представляет собой условное выражение на языке программирования ПАСКАЛЬ. Программа с индуктивным самообучением типа *ACLS* получает входную информацию в виде наборов данных, описывающих конкретные обстоятельства, для каждого из которых указана принадлежность к той или иной категории классификации. По этой информации программа строит вариант правила классификации, которое в рассматриваемом случае представляется в виде условного выражения на языке ПАСКАЛЬ. *ACLS* выводит правило классификации в виде дерева решений с ветвлением по значениям атрибутов. В рассматриваемом примере атрибутами являются «погода» и «в помещении». Атрибуты принимают значения «дождь, сухо, буря» и «да, нет» соответственно. Набор атрибутов должен быть достаточным для классификации информации с точки зрения эксперта. *ACLS* может выводить правила либо в виде дерева решений, либо в виде фрагмента программы на языке ПАСКАЛЬ.

23.8.2. Пример построения простого плана

Вначале рассмотрим приведенный ранее простейший пример. Необходимо решить, следует ли воспользоваться зонтиком. Оставим упомянутые ранее два атрибута («погода» и «в помещении») и четыре фактора, влияющие на принятие решений, т. е. атрибутами будут погода (может иметь три значения: дождь, сухо или буря), факты пребывания в помещении, в автомобиле или факт промокания «до костей» (каждый может принимать значение либо да, либо нет). Выбранные атрибуты представляются в виде файла. Общая форма этого файла пока не имеет значения. Для рассматриваемого примера файл атрибутов имеет вид:

```
4
погода        логический сыро сухо буря
в помещении   логический да  нет
промокший     логический да  нет
в автомобиле  логический да  иет
2
пользоваться не пользоваться
```

Число 4 сообщает системе, что будет использовано четыре атрибута, а число 2 задает количество классов. Таким образом, мы иастроили *ACLS* на конкретную задачу и готовы приступить к вводу примеров. Ниже приводятся четыре примера. Используется формат, в котором *ACLS* отображает текущее состояние набора примеров (отметим, что *ACLS* воспринимает первые шесть символов).

```
Номер Погода В доме Промок В авто Класс
Вводимые примеры
1. сухо  да   нет   нет не польз.
2. сыро  нет  нет   нет польз.
3. буря  нет  нет   да  не польз.
4. сыро  да   нет   нет не польз.
```

Первый пример означает, что если погода сухая и мы находимся в помещении, а не в автомобиле и не вымокли, то пользоваться зонтиком не надо. Остальные примеры расшифровываются аналогично.

На основании этих примеров *ACLS* может вывести правило:

```
погода
  буря: не пользоваться
  сухо: не пользоваться
  сыро: в помещении
          нет: пользоваться
          да: не пользоваться
```

Правило гласит, чтобы воспользоваться зонтиком, в первую очередь следует узнать, какая стоит погода. Если сухо или буря, тогда зонтик не нужен. Если дождь, тогда мы должны знать, находимся мы в помещении или нет. Если да, тогда зонтик не нужен; в противном случае — нужен.

Как правило, *ACLS* используется в диалоговом режиме. Например, можно убедиться, что на ситуацию «идет дождь, мы находимся вне дома, в автомобиле», полученное правило дает ответ «пользоваться». Чтобы это исправить, следует ввести пример:

```
Номер Погода В доме Промок В авто
Класс
Вводимый пример
5. сыро нет нет да не польз.
```

С учетом этого примера, правило примет вид

```
Погода
  буря: не пользоваться
  сухо: не пользоваться
  сыро: в помещении
          нет: в автомобиле
          нет: пользоваться
          да:  не пользоваться
          да:  не пользоваться
```

Процесс анализа, поиска и ввода противоречащего правилу примера и повторного построения правила можно продолжать, пока правило не удовлетворяет пользователя.

В примере, который будет описан ниже, было необходимо составить программу, управляющую действиями двух роботов при постройке арки из небольших блоков. Блоки, образующие опоры арки, обозначены буквами *A*, *B*, *C* и *D*. Задан окончательный порядок их расположения. Блок *C* должен находиться на блоке *A*, а блок *D* — на блоке *B*. Начальное их положение определяется пользователем, и задача состоит в разборке и перестановке блоков в нужном порядке. Можно использовать *ACLS* для построения правила на основе примеров, где в качестве значения классов — их конечное положение. Примеры могут вводиться либо с клавиатуры, либо из дискового файла примеров. В результате последова-

тельного применения выведенного правила удалось построить обе опоры арки. Ниже приводится более подробное описание с учетом взаимодействия роботов (см. разд. 23.9).

23.8.3. Индуктивное обучение при классификации образов

Индуктивная обучающая программа *ACLS* использовалась для классификации телевизионных изображений шоколадок «Черная магия». Задание на классификацию было предварительно опробовано фирмой «Юнимэйшн» по заказу фирмы «Роунтриз» в Йорке.

Для классификации использовались полутоновые изображения различных шоколадок. Полутоновое изображение состояло из 256 × 256 элементов. Рассматривалось 12 различных типов шоколадок. Для выделения отличительных признаков полутоновые изображения преобразовывались в силуэты. Затем в силуэтах выделялись признаки, т. е. производилось вычисление значений заданных пользователем атрибутов (признаков), по которым можно определить принадлежность объекта к тому или иному классу. По индуктивному обучающему алгоритму из набора примеров выводились правила классификации. Значения всех атрибутов выражались в виде целых чисел. В каждом узле дерева осуществлялось принятие решения по отношению «меньше» или «больше или равно», чем значение, связанное с данным узлом. Точность результата классификации новых изображений по выведенному правилу оказалась, как минимум, равна результату классификации этого же материала людьми и составила 80 %. Алгоритм использовал всю информацию, которую можно было извлечь из силуэта. Для повышения точности потребуется анализ полутонового изображения. Сформированные индуктивные правила более эффективны, чем традиционные статистические алгоритмы распознавания образов, и обеспечивают примерно такую же точность при меньшем числе проверок.

Эти эксперименты были проведены Блэйком, Моуфортом и Шепхертом в Эдинбурге. Они содержали сравнения с классическими адаптивными алгоритмами в пространстве признаков типа применяющихся в обучаемых системах технического зрения (например, фирм «Машин интеледженс» и «Отомэтикс»). Так как оба подхода в значительной степени дополняют друг друга, в сложных случаях рекомендуется их комбинировать. Процедуры, полученные с помощью *ACLS*, имеют лучшие временные характеристики. Поэтому возможный вариант построения системы предполагает применение обоих подходов, но основным должен быть классификатор, построенный экспертной системой, вызывающий подпрограммы распознавания системы технического зрения только в спорных случаях.

23.9. Взаимодействующие стратегии

В этом разделе описывается процесс формирования плана при решении простой задачи, но с условием, что обучаемый робот должен управлять действиями вспомогательного робота (рис. 23.3). Большой робот должен составить в заданном порядке четыре небольших кубика, первоначально расположенные в зоне действия малого робота в произвольном порядке. На две построенные опоры конструкции сверху следует уложить перекрытие, чтобы в результате получилась арка. Кубики помечены символами *A*, *B*, *C* и *D*. Окончательный порядок следования блоков в конструкции следующий: блок *C* ставится на *A*, блок *D* на *B*, и оба блока *A* и *B* ставятся «на землю» в зоне сборки большого робота. В зоне действия малого робота заданы четыре места хранения блоков, они обозначены *E0*, *E1*, *TEMP* и *TRANS*. Первоначально блоки расположены в *E0* и *E1* не более чем по два один на другом. *TRANS* — это зона передачи, из которой большой робот забирает очередной блок для сборки арки, *TEMP* — это временное место хранения, куда помещается блок, ко-

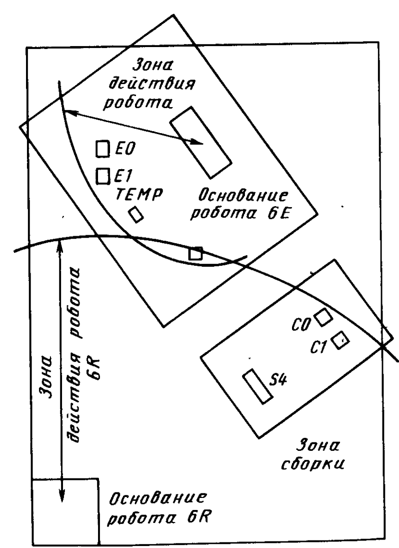


Рис. 23.3. Схема расположения роботов

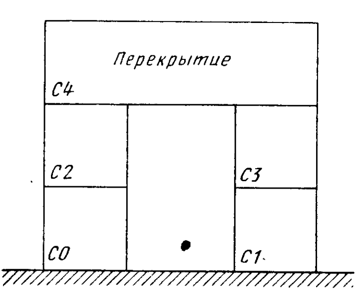


Рис. 23.4. Порядок сборки роботом *6R*

рый мешает взять нужный в данный момент блок. Перекрытие лежит на месте *S4* в зоне действия большого робота. Порядок сборки изображен на рис. 23.4, где *C0* — место блока *A*; *C1* — место блока *B*; *C2* — место блока *C*; *C3* — место блока *D*; *C4* — место перекрытия.

23.9.1. Состав оборудования

Используемое оборудование можно разделить на две группы: управляемое ПЭВМ «ЭППЛ-II» и управляемое ПЭВМ «Экорн этом». ПЭВМ «ЭППЛ-II» управляет действиями малого робота типа *6E* производства фирмы «Системс контрол». Связь с другой ПЭВМ осуществляется посредством речевого синтезатора «Тайп'н ток» фирмы «Вотракс» и настроенного распознавателя голоса. ПЭВМ «Экорн этом» управляет действиями большого робота типа *6R* фирмы «Системс контрол». Система «говорит» с помощью речевого синтезатора «Тайп'н ток» фирмы «Вотракс» и речевого распознавателя *VRM1002* фирмы «Интерстейт». Кроме того, в систему входит устройство управления робота *6R*. Положение двух роботов относительно друг друга было зафиксировано и подобрано так, что рабочая зона хранения блоков робота *6E* недоступна для робота *6R* и зона действия робота недоступна для робота *6E*.

23.9.2. Характеристика программного обеспечения

В состав программного обеспечения ПЭВМ «ЭППЛ-II» входит программа *ACLS* с расширенными возможностями. В качестве атрибутов используются местоположения блоков, а в качестве значения класса — их перемещения (т. е. какой блок надо поднять со своего места и на какое место его надо положить). Для ввода примеров используется клавиатура или файл примеров. Была несколько изменена команда *USER*. После нажатия клавиши «*U*» для уточнения введенной ранее команды, на дисплее отобразится

AON BON CON DON CLASS

Пользователь вводит информацию о том, где находятся кубики *A*, *B*, *C* и *D* (например, на другом кубике в месте *E0* и т. д.). После этого на экране ПЭВМ появится вопрос

EXECUTE MOVE?

на который пользователь должен ответить вводом ответа *YES* или *NO*. Если пользователь ответил *YES*, то робот *6E* выполняет перемещения, определяемые значением *CLASS*.

После окончания ввода примеров, пользователь может по индукции получить объясняющее их правило. По правилу осуществляется планирование только одного перемещения, т. е. только один кубик будет перенесен в новое положение. Система последовательно применяет это правило до тех пор, пока задание не будет выполнено.

Пользователь может инициировать последовательное применение правила по команде *AUTO*. Команда также используется в режимах отладки и проверки действий робота и при составлении, проверке и хранении словарей речевых распознавателей.

23.9.3. Характеристика программного обеспечения ПЭВМ «Экорн этом»

Пользователю предлагается список режимов в виде основного меню. Он может выбрать режимы настройки устройства речевого ввода, запоминания словарей и распознавания произнесенных команд. Имеются возможности обучения робота. В оперативной памяти может храниться до одиннадцати файлов, определяющих действия робота, их можно записывать на магнитную ленту или считывать с нее. Пользователь может задать режим *AUTOMATIC*, дополняющий режим *AUTO* ПЭВМ «ЭППЛ-II». В этом режиме ПЭВМ «Экорн этом» подчиняется командам ПЭВМ «ЭППЛ-II». При этом осуществляется интерпретация этих команд, сцепление соответствующих файлов с командами робота, выполняется перемещение кубиков из зоны *TRANS* в зону сборки или устанавливается перекрытие арки на две собранные опоры.

23.9.4. Контрольный пример

Можно обучить *ACLS* построению арки из произвольно расположенных в начальный момент блоков следующим образом:

(1)	*AON*	*BON*	*CON*	*DON*	*CLASS*	
	C	*E1*	*E0*	*B*	*A*	В АРКУ
(2)	*AON*	*BON*	*CON*	*DON*	*CLASS*	
	АРКА	*E1*	*E0*	*B*	*C* на *A*	
(3)	*AON*	*BON*	*CON*	*DON*	*CLASS*	
	АРКА	*E1*	*A*	*B*	*D* В *TEMP*	
(4)	*AON*	*BON*	*CON*	*DON*	*CLASS*	
	АРКА	*E1*	*A*	*TEMP*	В В АРКУ	
(5)	*AON*	*BON*	*CON*	*DON*	*CLASS*	
	АРКА	АРКА	*A*	*TEMP*	*D*НАВ	
(6)	*AON*	*BON*	*CON*	*DON*	*CLASS*	
	АРКА	АРКА	*A*	*B*	СТОП	

Полученное на основании этих примеров правило выполняется в режиме *AUTO* до тех пор, пока *CLASS* не примет значение СТОП, после чего управление передается пользователю.

Таким образом, мы применили индукционную обучающую программу *ACLS* для формирования пошаговых планов сборки небольшого числа элементов. Возможно использование синтезированной человеческой речи для связи между ПЭВМ. Могут использоваться также и речевые команды пользователя. Детчером и Мики была недавно описана улучшенная реализация обучающихся компонентов [39].

Естественно, что методика координирования действия управляемых ЭВМ устройств, использованная в рассмотренном примере, применима не только для организации взаимодействия двух роботов. Например, может понадобиться организовать взаимодействие обучающего робота и станка с ЧПУ. Кроме того, существуют общие проблемы взаимодействия ЭВМ и ее устройств ввода/вывода с другой ЭВМ. Ведущие промышленные и военные фирмы, занимающиеся вопросами автоматизации, должны уделять больше внимания человеческому фактору, делая познаваемыми процессы межсистемного обмена. Это позволяет предельно упростить задачу организации взаимодействия систем.

23.10. Дальнейшее развитие экспертных систем в составе роботизированных комплексов

Направления будущих работ можно предугадать по примерам использования сложных интегрированных систем управления, в частности при управлении атомными электростанциями, автоматизации управления воздушными полетами, при использовании в военных целях вычислительных сетей раннего предупреждения о ядерном ударе. Обзор по таким человеко-машинным системам был недавно сделан Копецом и Мики [36]. На основании этого анализа можно сделать следующий вывод о тенденциях развития промышленной робототехники.

Дальнейшее развитие технического и программного обеспечения робототехнических систем с увеличением их сложности и уменьшением зависимости от пользователя.

Учащение случаев неудачной роботизации, вроде того, что был описан Копецом и Мики на промышленном сталепрокатном стане фирмы «Хуговенс». Неудача была вызвана непродуманной заменой устаревшей автоматической системы на «усовершенствованную». «Усовершенствование» касалось стандартных программных средств. И, как это часто происходит в современных промышленных системах, результат внедрения новых программных средств оказался непредсказуемым.

Понимание того, что не всегда следует «идти напролом». Чтобы не пришлось возвращаться к составлению планов и проектированию системы, необходимо знать, как следует решать ту или иную производственную задачу.

Дальнейшее распространение дружественных к пользователю робототехнических систем, использующих последние программные разработки на основе экспертных систем, а не традиционных алгоритмов и баз данных.

Недавно был выпущен обзор [37] результатов исследования влияния совместимости человека и машины на адекватность программных структур выполненных машиной описаний и стратегий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McDermott, J., XSEL: A computer sales-person's assistant, in Hayes, J. E., Michie, D., and Pao Y-H., Eds., *Machine Intelligence* 10, Horwood, Chichester, and Halsted Press, New York, 1982, pp. 325—337.
2. Clarke, M. R. B., Ed., A quantitative study of King and Pawn against King, *Advaces in Computer Chess 1*, Edinburgh University Press, 1977, pp. 108—115.
3. Bratko, I., Proving correctness of strategies in the AL1 assertional language *Information Processing Letter*, Vol. 7, 1978, pp. 223—230.
4. Kopec, D. and Niblett, T., How hard is the play of the King-Rook-King-Knight ending? Clarke, M. R. B., Ed. *Advances in Computer Chess*, Vol. 3, 1980, pp. 57—81.

5. Shortliffe, E. H., *Computer-Based Medical Consultations: MYCIN*, Elsevier, New York, North Holland, 1976.
6. Pople, H. E., Myers, J. D., and Miller, R. A., DIALOG: a model of diagnostic logic for internal medicine, *Proceedings of the 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence* (IJCAI-77), Computer Science Department, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, 1977. (This program was subsequently renamed INTERNIST. It is now called CADUCEUS.)
7. Wipke, W. T., Computer-assisted three-dimensional synthetic analysis, in W. T. Wipke, Heller, S. R., and Hyde, E., Eds., *Computer Representation and Manipulation of Chemical Information*, Wiley-Interscience, New York, 1977, pp. 147—174.
8. Michalski, R. S. and Chilausky, R. L., Learning by being told and learning from examples: an experimental comparison of the two methods of knowledge acquisition in the context of developing an expert system for soybean disease diagnosis, in *International Journal of Policy Analysis and Information Systems*, Vol. 4, 1980, pp. 125—161.
9. Buchanan, B. G., Smith, D. H., White, W. C., Gritter, R., Feigenbaum, E. A., Lederberg, J., and Djerassi, C., Applications of Artificial Intelligence for chemical inference, XXII, Automatic rule formation in mass spectrometry by means of the Meta-DENDRAL program, *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 98, 1976, pp. 6168—6178.
10. Bratko, I. and Mulec, P., An experiment in automatic learning of diagnostic rules, *Informatica*, Vol. 4, 1980, pp. 18—25.
11. Ambler, A. P., Barrow H. G., Brown, C. M., Burstall, R. M., and Popplestone, R. J., A versatile system for computer-controlled assembly, *Artificial Intelligence*, Vol. 6, No. 2, 1975, pp. 129—156.
12. *CAP-4 Programmers Manual*, Image Processing Group, University College, London, 1977.
13. Jelinek, J., The informative function and its application in parallel picture processing, *Research Memorandum MIP-R-117*, Machine Intelligence Research Unit, University of Edinburgh, 1977.
14. Armstrong, J. L., Programming a parallel computer for computer vision, *Computer Journal*, Vol. 21, 1978, pp. 215—218.
15. Duff, M. J. B., Review of the CLIP image-processing system, *Proceedings of the National Computer Conference*, 1978, pp. 1055—1060.
16. Jelinek, J., An algebraic theory for parellel processor design, *Computer Journal*, Vol. 22, 1979, pp. 363—375.
17. Zdrahal, Z. and Blake, A., A simple emulator of a parallel processor: user guide, Machine Intelligence Research Unit, University of Edinburgh, 1980.
18. Blake, A. and Ruttledge, H., CAP assembler and driver of CLIP-4 emulator, Machine Intelligence Research Unit, University of Edinburgh, 1980.
19. Blake, A., Edge growing and relaxation in parallel, *Research Memorandum MIP-R-134*, Machine Intelligence Research Unit, University of Edinburgh, 1981.
20. Zdrahal, Z., Bratko, I., and Shapiro, A., Recognition of complex patterns using cellular arrays, *Computer Journal*, Vol. 24, No. 3, 1981, pp. 263—271.
21. Blake, A., A convergent edge relaxation algorithm, *Research Memorandum MIP-R-135*, Machine Intelligence Research Unit, University of Edinburgh, 1982.
22. Blake, A., Fixed point solutions of recursive operations on Boolean arrays, *Computer Journal*, Vol. 25, 1982, pp. 231—234.
23. Kowalski, R. A., *Logic for Problem Solving*, North-Holland, 1979.
24. Michie, D., Ed., *Expert Systems in the Micro-electronic Age*, Edinburgh University Press, 1979.
25. Michie, D., The state of the art in machine learning, in *Introductory Readings in Expert Systems*, Michie, D., Ed., Gordon and Breach, London and New York, 1982, pp. 208—229.
26. Michie, D., Computer chess and the humanisation of technology, *Nature*, Vol. 229, 1982, pp. 391—394.
27. Hewitt, C., Viewing control structures as patterns of passing messages, *Artificial Intelligence*, Vol. 8, 1977.
28. Doran, J. E. and Michie, D. Experiments with the Graph Traverser program, *Proceedings of the Royal Society, A*, Vol. 294, 1966, pp. 235—259.
29. Fikes, R. E. and Nilsson, N. J., STRIPS: a new approach to the application of theorem proving to problem solving, *Artificial Intelligence*, Vol. 2, 1791.

30. Fahlman, S. E., A planning system for robot construction tasks, *Artificial Intelligence*, Vol. 5, 1974, pp. 1—49.
31. Smith, R. G., A framework for distributed problem solving, *Proceedings Sixth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Vol. 2, Tokyo, Japan, 1979, pp. 836—841.
32. Doran, J. E., Planning and robots, in Meltzer, B. and Michie, D., Eds. *Machine Intelligence 5*, American Elsevier, New York, 1970.
33. Corkill, D. D., Hierarchical planning in a distributed environment, *Proceedings Sixth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Vol. 1, Tokyo, Japan, 1979, pp. 168—175.
34. McArthur, D. and Klahr, P., *The ROSS Language Manual*, N-1854-AF, The Rand Corporation, Santa Monica, California, 1982.
35. Paterson, A. and Niblett, T., *ACLS Manual*, Intelligent Terminals Limited, Oxford and Edinburgh, 1982.
36. Kopec, D. and Michie, D., *Mismatch between Machine Representations and Human Concepts*, Commission of the European Economic Community (FAST program), Brussels, 1983.
37. Michie, D., Automating the synthesis of expert knowledge, *ASLIB Proceedings*, Vol. 36, 1984, pp. 337—343.
38. McCabe, F. G., *Micro-PROLOG User's Manual*, Logic Programming Associates, London, 1981.
39. Dechter, R. and Michie, D., Structured induction of plans and programs, *Working Paper*, IBM LA Scientific Center, Los Angeles, and the Turing-Institute, Glasgow, 1984.

Список дополнительной литературы

Ferguson, R., PROLOG: a step toward the ultimate computer language, *BYTE*, November 1981, pp. 384—399.
Fikes, R. E., Hart, P. E., and Nilsson, N. J., Some new directions in robot problem solving, in Meltzer, B. and Michie, D., Eds., *Machine Intelligence 7*, Edinburgh University Press, 1972.
Hayes, P. J., The naive physics manifesto, Michie, D., Ed., in *Expert Systems in the Micro-electronic Age*, Edinburgh University Press, 1979, pp. 242—270.
Hunt, E. B., Martin, J., and Stone, P., *Experiments in Induction*, Academic Press, New York, 1966.
Juhn, H., *Object recognition with parallel computation of high-level features*, M. S. thesis, Department of Computer Science, University of Illinois, Urbana, 1980.
Mozetik, I., User's manual for the AL1.5 system, *Research Memorandum MIP-R-130*, Machine Intelligence Research Unit, University of Edinburgh, 1980.
Paterson, A., *AL/X Manual*, Intelligent Terminals Limited, Oxford and Edinburgh, 1981.
Quinlan, J. R., Discovering rules by induction from large collections of examples, in Michie, D., Ed., *Expert Systems in the Micro-electronic Age*, Edinburgh University Press, 1979, pp. 168—201.
Quinlan, J. R., Semi-autonomous acquisition of pattern-based knowledge, in Michie, D., Ed., *Introductory Readings in Expert Systems*, 1982, pp. 192—207.
Quinlan, J. R., Learning efficient classification procedures and their application to chess end-games, in Michalski, R. S., Carbonell, G., and Mitchell, T., Eds., *Machine Learning: An Artificial Intelligence Approach*, Tioga, Palo Alto, 1982.
Raggett, D., A survey of computer vision research, *Research Memorandum MIP-R-128*, Machine Intelligence Research Unit, University of Edinburgh, 1980.
Reiter, J. E., AL/X: an expert system using plausible inference, paper presented at British Computer Society Conference on Practical Applications of Knowledge Engineering, June 29, 1980, Intelligent Terminals Limited, Oxford and Edinburgh.
Shapiro, A., Interactive ID3: documentation, Machine Intelligence Research Unit, University of Edinburgh, 1981.
Warren, D. H. D., PROLOG on the DEC system-10, in Michie, D., Ed., *Expert Systems in the Micro-electronic Age*, Edinburgh University Press, 1979, pp. 112—121.
Winston, P. H., The MIT robot, in Meltzer, B., and Michie, D., Eds., *Machine Intelligence, 7*, Edinburgh University Press, 1972.

Глава 24

РОЛЬ ЭВМ В ПОВЫШЕНИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОСТИ РОБОТА

У. Рембольд, Р. Диллмен, П. Леви, Университет г. Карлсруэ, ФРГ

24.1. Введение

Промышленные роботы получили очень широкое распространение в современном производстве. В настоящее время они с успехом выполняют множество функций в различных областях. Типовыми операциями являются перемещение и установка деталей, точечная и дуговая сварка, окраска распылением, простейшие сборочные операции. Предполагается, что в будущем роботы смогут выполнять сборку весьма сложных узлов. Однако, чтобы добиться высокой эффективности в промышленности, следует перейти к конструированию изделий, приспособленных для сборки роботами. У человека есть два весьма подвижных исполнительных органа, которые легко управляются и могут выполнять чрезвычайно сложные операции. Кроме того, человек обладает весьма совершенной системой очувствления и почти неограниченным объемом памяти. Он также может обучаться и накапливать опыт, планируя и выполняя задания с использованием очень большой базы знаний. Таким образом, для обучения робота сборочным операциям его необходимо снабдить знаниями человека и множеством различных средств очувствления. Все это можно реализовать только с помощью ЭВМ. Это означает, что в настоящее время имеется потребность как в мощных и дешевых универсальных ЭВМ, так и в весьма сложных и быстродействующих специализированных вычислительных устройствах, а также новых подсистемах очувствления. Кроме того, пользователь робототехнических систем должен научиться создавать различные управляющие программы на проблемно-ориентированных языках, не тратя больших усилий на их изучение.

В данной главе рассматривается роль ЭВМ в обеспечении интеллектуальности роботов. Основное внимание в ней уделено системам программирования, экспертным системам, развитию систем очувствления, лазерным сканирующим системам и архитектуре ЭВМ, перспективной с точки зрения управления роботами.

24.2. Системы программирования

Технологическая гибкость и многофункциональность роботов, используемых для сборочных операций, может быть обеспечена только эффективной системой программирования. Когда возникает необходимость описания действий и объектов в трехмерном пространстве, традиционная методика программирования (например, метод предварительного обучения) оказывается чересчур громоздкой. Она неудобна и в тех случаях, когда исполнительный орган должен двигаться по сложной траектории или производить операции на движущемся объекте. Поэтому в последнее время интенсивно разрабатываются новые языки программирования роботов.

В табл. 24.1 перечислены некоторые из разработанных систем программирования [1]. Большинство систем либо непосредственно используют язык ассемблера, либо применяют компиляторы, т. е. в них любое движение робота должно быть описано программистом. Поэтому даже для простейшей задачи сборки число операторов программы оказывается весьма значительным. В настоящее время широко распространена только одна система высокого уровня — АУТОПАСС, однако ее возможности в части описания элементарных примитивов сборочных операций ограничены. Примером оператора на языке АУТОПАСС может служить фраза «взять болт, вставить в отверстие». Три других языка используют общие концепции языков программирования станков с ЧПУ и предназначены для программирования роботов, обслуживающих такие станки. В данном случае от программиста требуется лишь знакомство с методикой программирования станков с ЧПУ. Однако эти языки сильно усложняются при попытке определять переменные или обрабатывать данные подсистем очувствления, следящих за движущимися объектами.

В табл. 24.2 указаны основные характеристики систем программирования роботов [1]. Представляют интерес такие парамет-

24.1. Возможности языков программирования роботов

Система программирования	Базовый язык	Число манипуляторов	Возможность замены манипуляторов	Тип чувствительного органа	Функции СТЗ
ФАНКИ	Коды			Датчик касания	
ТЗ	Ассемблер	1		Концевые выключатели	
ЭНОРЭД	ЧПУ	1			
ЭМИЛИ	Ассемблер	2	×	Датчики касания и определения близости	
РЦЛ	ФОРТРАН	1		Датчик касания	
РПЛ	ФОРТРАН	1		СТЗ	Определение положения и ориентации
СИГЛА	Ассемблер	1—4	×	Силомоментные датчики	
ВАЛ	Ассемблер	1		СТЗ	
АЛ	АЛГОЛ	2	×	Силомоментные датчики	Распознавание
ХЕЛП	ПАСКАЛЬ	1—4	×		
МЕЙПЛ	ПЛ/1	1	×	Датчики усилий и определения близости	
МЦЛ	АПТ	1	×	Датчик касания СТЗ	Обучение, распознавание
ПАЛ	Преобразования	1	×		
АУТОПАСС	ПЛ/1	1	×	Различные	Распознавание, обучение

ры, как конструкция манипулятора, число степеней подвижности, а также типы датчиков. В некоторых языках имеется возможность описывать совместную работу нескольких манипуляторов различной конструкции. В табл. 24.3 приведен список конструкций, желательных в языке системы программирования роботов [1]. Кроме

24.2. Реализации языков программирования роботов

Название робота	Фирма-изготовитель	Конструкция манипулятора	Число степеней подвижности	Система программирования
ТЗ	«Цинциннати милакрон»	В В В В В В	6	ТЗ
ПУМА	«Юнимейшн»	В В В В В В	6	РПЛ ВАЛ
«Стэнфорд»	«Шейнман»	В В П В В В	6	ПЛ ПАЛ
ИБМ АРМ	ИБМ	В П П П В В В	7	ФАНКИ ЭМИЛИ МЕЙПЛ АУТОПАСС
ПАКС АРМ	«Бендикс»	В П П В В В	6	РЦЛ
«Аллегро»	«Дженерал электрик»	П П П В В В	6	ХЕЛП
«Эномэтик»	«Энорэд»	П П П В	4	ЭНОРЭД
«Сигма»	«Оливетти»	П П П П	4	СИГЛА

Примечание. В — вращательное сочленение; П — призматическое сочленение.

24.3. Лингвистические средства языков программирования роботов

Программирование обучения
Управляющие структуры
Стандартные подпрограммы
Вложенные циклы
Типы данных
Наличие комментариев
Средства расчета траекторий
Команды исполнительных органов
Команды управления инструментом
Параллельное выполнение операций
Управление периферийными устройствами
Взаимодействие с силомоментными датчиками
Взаимодействие с датчиками касания
Взаимодействие с датчиками определения близости
Взаимодействие с СТЗ

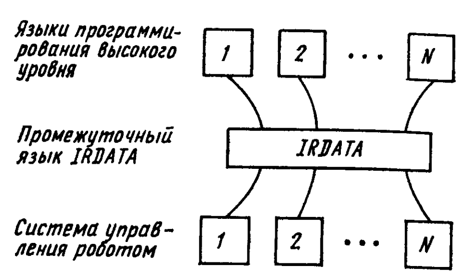


Рис. 24.1. Схема использования промежуточного языка

традиционных возможностей языков программирования в этих системах должны быть предусмотрены новые, специфические средства (например, операторы описания векторов, систем координат, вращения, перемещения). Язык должен позволять описывать траектории движения исполнительных органов и обеспечивать одновременную работу нескольких манипуляторов. Под управлением программы робот должен оперировать рабочими органами и инструментами. Специфические лингвистические средства должны также позволять описывать обработку сигналов от различных датчиков.

Большинство современных систем программирования предполагают использование компиляторов, выходная информация которых представлена в некотором стандартном промежуточном формате (рис. 24.1). Изготовители роботов, в свою очередь, проектируют систему управления таким образом, что интерфейсы контроллеров в них рассчитаны именно на этот промежуточный формат. Таким способом обеспечивается возможность использовать для программирования роботов различные языки, располагая лишь одним стандартным интерфейсом.

Кроме собственно языка необходима мощная система программирования, включающая в себя пакеты прикладных программ, и достаточно дешевая ЭВМ для разработки программного обеспечения. На рис. 24.2 приведена расширенная схема системы программирования сборочных роботов. Пользователь описывает объект и рабочее место на проблемно-ориентированном языке. Эта информация обрабатывается подсистемой геометрического моделирования, которая формирует модель технологической среды.

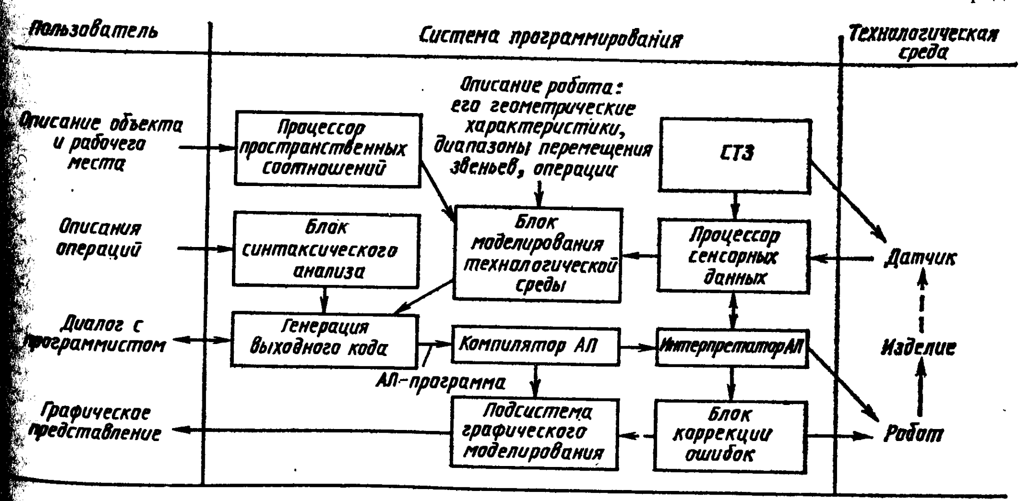


Рис. 24.2. Структура современной системы программирования (язык АЛ)

Все движения робота описываются операторами, которые обрабатываются программами синтаксического анализа. Полученные данные объединяются с моделью технологической среды. Результирующая модель задания подается на компилятор языка АЛ. В системе предусмотрен интерактивный режим работы с компилятором, что позволяет оперативно вводить и редактировать описания. Компилятор АЛ формирует управляющую программу в промежуточном формате. Она загружается в управляющую ЭВМ робота. Сигналы от подсистем очувствления робота обрабатываются процессором сенсорных данных. Если объекты технологической среды изменили свое местоположение, процессор сенсорных данных соответствующим образом изменяет модель технологической среды. Та же информация передается интерпретатору программы, представленной в промежуточном формате, для коррекции движения рабочего органа. Подсистема графического моделирования дает возможность изобразить графически технологическую среду робота, проверит правильность его движений и выявит возможные столкновения.

Система графического моделирования входит в программное обеспечение системы программирования робота или устройства управления (рис. 24.3). На ранних стадиях проектирования робота и его кинематической схемы (сочленений, звеньев, рабочих органов) сборочную ячейку и ее окружение можно моделировать на графическом дисплее. С его помощью можно проверить и оптимизировать траектории перемещений (интерполированные в прямоугольной системе координат), а также соответствующие преобразования координат. С помощью программы моделирования динамических характеристик можно определить реакцию приводных двигателей и проверить алгоритмы управления, оценивая динамические свойства манипулятора. Для отладки программы сборки в целом система программирования взаимодействует с моделью робота, на которой проверяются все движения. С помощью тестовых программ можно проанализировать взаимодействие различных частей робота с изделием без риска возможных столкновений. По завершении отладки последовательности сборочных операций программа загружается в память управляющей ЭВМ, которая выполняет ее в реальном масштабе времени, управляя действиями манипулятора. На этом этапе можно проверить весь процесс сборки.

Моделирование механической части робота (например, с двумя подвижными манипуляторами) позволяет отладить все необходимые программы без использования самого робота. Системы графического моделирования сборки способствуют дальнейшему развитию программных средств программирования на уровне заданий.

Типовая система графического моделирования может быть реализована на ЭВМ средней мощности. Она взаимодействует с графическим дисплеем, генератором векторов и кадровой памятью. С помощью системы можно построить геометрические модели манипулятора и технологической среды в виде совокупности обобщенных тел. Сочленения моделируемого манипулятора перемещаются по рассчитанным траекториям по командам управляющей программы. По трехмерной геометрической модели можно выстроить аксонометрические проекции, представляющие технологическую среду. Построенные двухмерные проекции модели отображаются на экране терминала. Входным языком имитационной системы моделирования может быть промежуточный формат языка АЛ [2] (для отладки программ сборки) или модифицированные управляющие программы (для экспериментальных исследований). В системе моделирования предусмотрены средства обучения, позволяющие управлять перемещениями робота в различных системах координат (мировой, робота и рабочего органа) с помощью пульта-приставки с переключателями и мнемонической рукояткой. Бо́льшая часть программ проверки траекторий реализована на управляющей ЭВМ робота. Они выполняются под управлением мультипрограммной операционной системы реального времени. На рис. 24.4 представлена структурная схема системы моделирования робота с системой управления движением и интерфейсами.

Система состоит из трех основных частей: подсистемы моделирования робота; подсистемы моделирования среды; подсистемы формирования команд движения.

Имеются средства обнаружения коллизий и удаления невидимых линий. Интерактивная система моделирования робота позволяет формировать отдельные геометрические модели узлов робота, включая рабочий орган. Для упрощения моделирования используют набор обобщенных тел. Вторая моделирующая подсистема используется для описания технологической среды, к которой относятся все объекты, доступные роботу. Программы геометрического моделирования формируют базы данных с информацией об объектах и информационные структуры, описывающие положение и ориентацию всех геометрических тел, а также положение осей всех звеньев манипулятора. Данные о перемещениях, представленные в виде операторов над совокупностью координатных систем, связанных с геометрическими телами, генерируются планировщи-

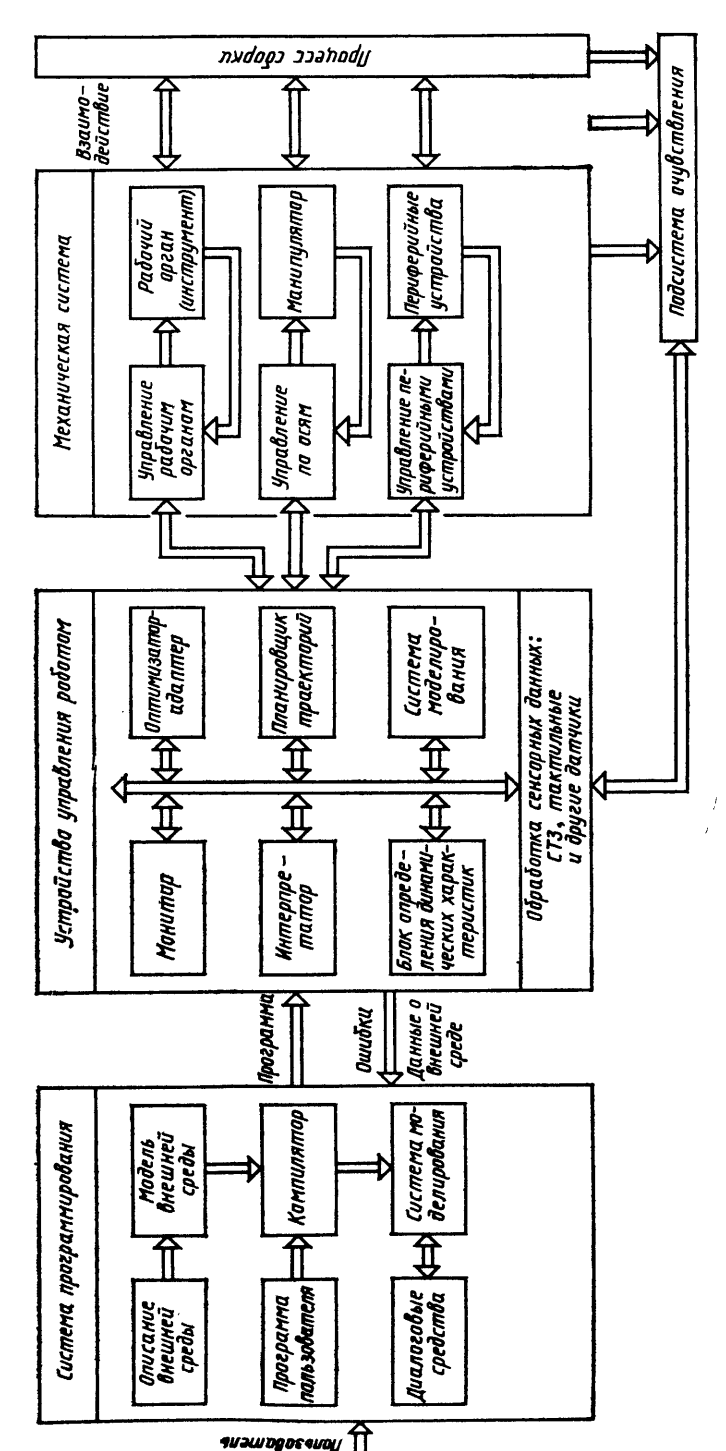


Рис. 24.3. Структурная схема робота-сборщика

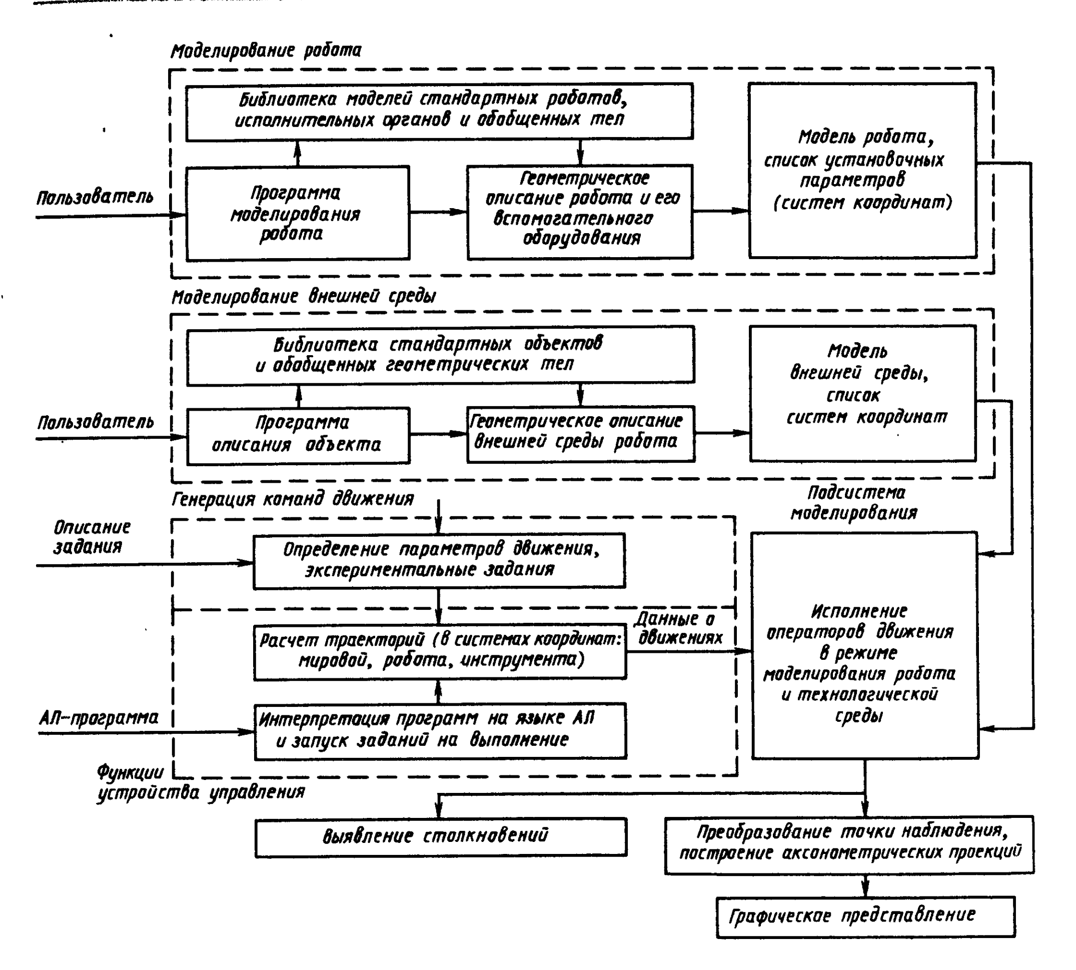


Рис. 24.4. Структурная схема системы моделирования робота

ком траекторий. Для определения движений и взаимодействия робота с объектом могут использоваться различные интерфейсы. Для экспериментальных исследований обеспечивается непосредственный доступ к планировщику траекторий. Второй интерфейс предназначен для отладки программ сборки: на его вход поступает программа в промежуточном формате системы АЛ [2]. Подсистема формирования команд движения генерирует команды в соответствии с выбранной конфигурацией манипулятора и перемещаемых объектов. Погрешности перемещения измеряются внешним модулем (он же фиксирует столкновения). ЭВМ при этом может работать в режиме отладки или воспроизведения программы. Движения отображаются на графическом дисплее. С помощью преобразований возможно построение любой проекции (сверху, спереди, сбоку). Имеется также возможность выполнять операции масштабирования и удаления невидимых линий.

24.3. Экспертные системы и роботы

Экспертная система представляет собой интеллектуальную программу, способную принимать решения, аналогично тому, как это делает человек (см. гл. 23). Информационное обеспечение таких систем составляют сведения и правила, которые используются в промышленности для решения различных задач. На рис. 24.5 приведена упрощенная структура экспертной системы.

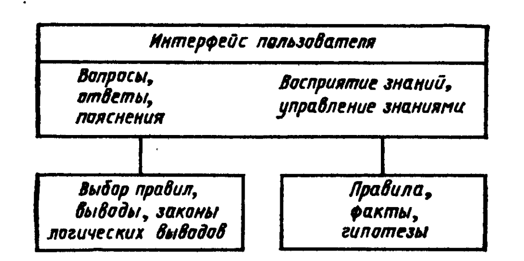


Рис. 24.5. Упрощенная структура экспертной системы

Используемые базы знаний должны обеспечивать достаточно оперативное получение и обработку знаний. Они также должны обосновывать проведенные логические выкладки и принятые решения. В робототехнике экспертные системы используются при планировании и управлении сборкой, а также при выявлении и устранении возникающих при этом ошибок.

При анализе ошибок необходимо учитывать не только погрешности размещения деталей, но и ограниченную точность их изготовления [3]. Программа проверки, пользуясь геометрическими моделями (например, построенными САПР), имитирует действия робота и накопление погрешностей. Если в процессе проверки выявляются дополнительные ограничения, несоблюдение которых может привести к неправильной сборке, план сборки может быть изменен.

Автоматическое планирование действий робота — новая отрасль робототехники. Задачи, возникающие при автоматическом построении полного плана сборочных операций в условиях производства, достаточно сложны. По этой причине большинство выполняемых роботами заданий до сих пор планируется человеком, а не ЭВМ.

Одной из развитых робототехнических систем, в которой планируется использование ограниченной экспертной системы, является гибкая производственная ячейка фирмы «Вестингауз», выполняющая кузнечную обработку лопаток паровых турбин [4]. Она позволяет автоматически регулировать производственный процесс при изготовлении различных партий лопаток и не требует при этом вмешательства человека ни в процессе производства, ни при наладке. Программирование такой системы осуществляется с помощью языка продукций. Основным оборудованием этой производственной ячейки являются два робота с подсистемами зрительного очувствления и несколько станков с ЧПУ для обработки лопаток (рис. 24.6).

Ячейка работает следующим образом. Рабочие доставляют контейнеры с заготов-

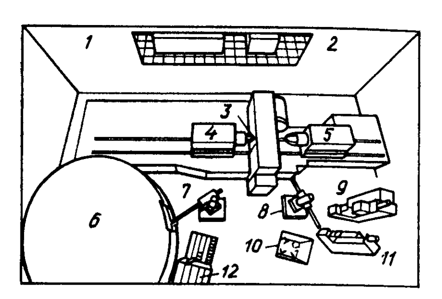


Рис. 24.6. Состав робототехнической ячейки фирмы «Вестингауз»:

1 — управляющая ЭВМ; *2* — СТЗ; *3* — молоты; *4* — наковальня А; *5* — наковальня В; *6* — вращающаяся подовая печь; *7* — робот А; *8* — робот В; *9* — оптический измеритель; *10* — станция разгрузки; *11* — машина для резки; *12* — СТЗ идентификации деталей

ками на станцию идентификации деталей. Так с помощью СТЗ определяется положение заготовки в контейнере. Затем робот захватывает заготовки и загружает их для нагревания в печь с вращающимся подом. Тот же робот перемещает нагретые в печи заготовки в ковочную машину для формования. Второй робот удаляет предварительно обработанные заготовки и переносит их на обрезной пресс, где удаляется излишний материал и штампуется идентификационный номер. После этого робот переносит заготовки на оптическую измерительную систему. Затем этот же робот опускает заготовку в контейнер для передачи на дальнейшую обработку.

Такое построение производственной ячейки представляет собой первый шаг на пути преобразования завода турбинных деталей в предприятие будущего. Оно будет «населено» роботами и будет управляться вычислительными машинами. Использование роботов дает возможность такой производственной ячейке работать с заготовками различных размеров. Зрительное очувствление позволяет обойтись без специализированных приспособлений. Вращающаяся подовая печь может нагревать заготовки различных размеров.

Сложность экспертных систем для роботов обусловлена двумя причинами [5]. Во-первых, сложно организовать управление конкретной производственной ячейкой от ЭВМ, поскольку машина в данном случае — абстрактная единица, а ячейка существует в реальной производственной среде. Во-вторых, большинство технологических процессов включает в себя элементы случайности (например, заранее не известно значение допусков). Это осложняет формализацию сборки и ее описания и приводит к возникновению задач, часть которых до

сих пор не получила удовлетворительного решения.

Устранение неопределенностей, составляющих неотъемлемую часть любого производственного процесса, должно выполняться с помощью подсистем очувствления. Однако в робототехнике до сих пор проведено недостаточно исследований по анализу и моделированию стохастических аспектов использования этих подсистем. Это обусловлено тем, что обработка больших массивов данных, формирующихся в системах с многими датчиками (например, в производственной ячейке фирмы «Вестингауз» таких датчиков 58), и их интегрирование в одну совместимую модель, которая отражала бы действительное состояние среды, требуют огромной вычислительной мощности.

24.4. Языки программирования подсистем зрительного очувствления

Специфика задач технического зрения требует применения языков программирования, обладающих определенными свойствами. Например, языки ЛИСП и ПРОЛОГ используются для решения задач искусственного интеллекта, АЛГОЛ — научных задач и т. д. Неправильным следует считать подход, когда языки программирования рассматриваются в отрыве от оборудования системы, поскольку программное и аппаратное обеспечение должны быть полностью совместимы [6]. При разработке языка программирования, предназначенного для создания программного обеспечения СТЗ или систем с большим числом датчиков, необходимо включить в него средства, позволяющие выполнять следующие требования.

А. Предварительную обработку образов (восстановление, улучшение):

(а) передачу команд зрительным датчикам;

(б) обработку всех элементов разложения;

(в) возможность параллельной локальной обработки;

(г) компактное представление двух- и трехмерных структурированных данных.

Б. Выделение образов (выделением признаков, распознавание):

(а) арифметические операции;

(б) статистическую обработку;

(в) команды режима обучения;

(г) команды определения признаков;

(д) количественное описание признаков.

В. Анализ образов:

(а) определение структур данных (списки, графы);

(б) определение отношений между объектами («выше», «ниже»);

(в) композицию и декомпозицию отношений;

(г) накапливание знаний;

(д) построение моделей (геометрических, символических и др.).

Г. Анализ сцен:

(а) анализ имеющихся знаний;

(б) правила логических выводов;

(в) логические вычисления и обработку запросов;

(г) обработку знаний.

Требования А и Б частично удовлетворяются в специализированных языках для обработки изображений. Например, язык *RAIL* [7] определяет 45 визуальных признаков, таких, как число отверстий, цвет, диаметр, площадь, положение. Идентификация объекта осуществляется непосредственно включением в программу выбранных программистом визуальных признаков. Кроме того, в языке имеются операторы калибрования камеры и робота. Средства, обеспечивающие выполнение требований Б и В до сих пор практически не реализованы. В настоящее время работы по созданию новых языков программирования, использующих средства искусственного интеллекта, еще не вышли за рамки экспериментов.

Только разработка языка, удовлетворяющего всем перечисленным требованиям, позволит создать эффективную экспертную систему для производственных роботизированных ячеек.

24.5. Архитектура ЭВМ

Автоматизация сборочных операций требует обработки сенсорной информации, поступающей от множества датчиков. Эти данные отражают состояние технологической среды, окружающей робот, и определяют его дальнейшее взаимодействие с ней. Стратегии роботизированной сборки должны реализоваться в реальном масштабе времени. Интерполяция и преобразование координат рассматриваются как стандартные операции. Для того, чтобы сборочный робот обладал технологической гибкостью и эффективно выполнял задания, его структура должна соответствовать выполняемой работе, а устройство управления должно иметь в своем составе программы интерпретации языка АЛ. Чем выше уровень интеллектуальности (способности к адаптации) такой системы, тем выше должна быть скорость обработки данных. До настоящего времени было сделано немало попыток разработки программного обеспечения сборочных работ, функционирующего в ральном масштабе времени. В ранних разработках [8] применялись мини-ЭВМ (интерпретаторы), а для фоновой компиляции программ использовались более мощные ЭВМ. Основные функции управления роботами могут осуществляться быстродействующими 16-разрядными микропроцессорами, объединенными в мультипроцессорную систему, что позволяет реализовать декомпозицию задачи управления на отдельные модули [9, 10].

Было создано несколько мультипроцессорных систем с мощным программным обеспечением. В 1981 г. был разработан стандарт на мультипроцессорные системы управления [11] (в том числе — устройства управления станков с ЧПУ, многоосевые контроллеры, геометрические преобразователи и интерфейсы ввода/вывода). Для выполнения проблемно-ориентированной программы сборки в реальном масштабе времени наиболее удобна симметричная мультипроцессорная архитектура. Основными особенностями такой архитектуры являются высокая скорость вычислений, устойчивость к сбоям, параллельное выполнение заданий и динамическая конфигурация системы. Параллельная обработка заданий на различных уровнях управления требует создания системы распределенной обработки данных. Многошинная система с аппаратными арбитрами позволяет производить параллельную передачу данных. Общая оперативная память, распределенная операционная система, выполнение системных функций всеми процессорами, а также возможность расширения системы до 20 или более процессоров делает ее пригодной для программирования сложных сборочных задач, выполняемых ячейками из нескольких роботов. Можно выделить следующие отличительные особенности мультипроцессорных систем управления роботами: несколько уровней управления, распределение функций управления между микропроцессорами, распределенная операционная система, симметричная модульная конфигурация аппаратуры обработки данных, многошинная локальная сеть связи, возможность расширения без реконфигурации программного и аппаратного обеспечения, наличие модулей специального назначения (ввода/вывода сенсорных данных, арифметических данных, быстрого преобразования Фурье, интерполяторов), параллельная декомпозиция проблемно-ориентированных программ, хранение модели среды в общей памяти.

24.5.1. Общая структура системы управления роботом в реальном масштабе времени

Система управления роботом (см. рис. 24.4) разделяется на следующие элементы: манипулятор (кинематическая цепь), система управления движением по осям, система управления рабочим органом, управление периферийными устройствами, подсистема очувствления, центральная система управления роботом, система программирования.

24.5.2. Манипуляторы промышленных роботов

Манипулятор робота представляет собой кинематическую цепь с призматическими и вращательными сочленениями. Для того, чтобы привести рабочий орган (инструмент) в произвольную точку рабочего пространства и придать ему произвольную ориентацию, необходимо 6 сочленений. Для высокой точности позиционирования рабочего органа (погрешность повторного позиционирования менее 1 мм) каждое сочленение должно управляться системой с высокой разрешающей способностью.

В случае контурного управления сочленения должны следовать по заданным траекториям без задержек. Большинство современных роботов общего назначения оборудованы системами сервоуправления сочленениями. Если требуются высокое быстродействие и высокая точность следования по траектории, требования к системам сервоуправления возрастают. Более совершенные системы осуществляют управление по приведенным ускорениям с нелинейной развязкой сочленений [12, 13].

24.5.3. Система управления движением по осям

Большинство современных многофункциональных роботов оборудованы устройствами позиционного управления. Рабочий орган робота должен перемещаться по определенной траектории. Траектория планируется центральным устройством управления по данным, получаемым в реальном времени от подсистем очувствления. На стратегию управления оказывают влияние следующие факторы: сила тяжести, центробежная сила, кориолисова сила, трение, противодействие.

Для решения задач управления разработано много алгоритмов [14, 17]. Их реализация оказывается неэффективной из-за необходимости выполнения большого числа арифметических операций. Поэтому для построения эффективного алгоритма управления необходимо резко уменьшить их количество.

Управление сочленениями осуществляется в собственной системе координат робота. Траектории в этой системе коордиат рассчитываются постпроцессорами, которые

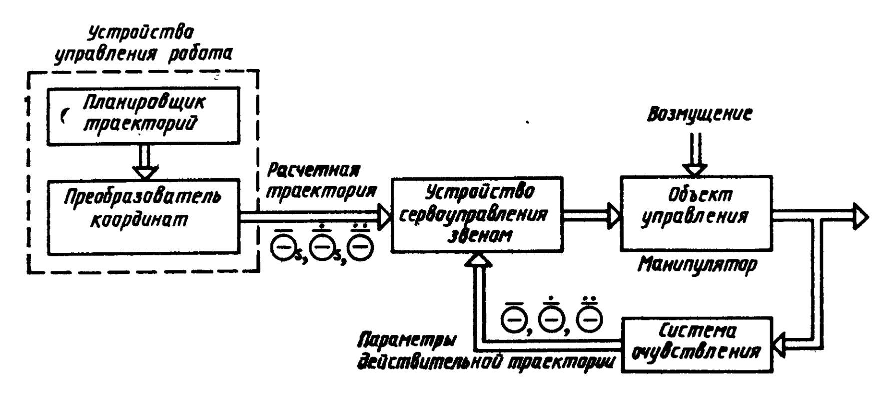


Рис. 24.7. Структурная схема системы сервоуправления звеньями

преобразуют мировые координаты в систему координат сочленений манипулятора (рис. 24.7). В настоящее время предпринимаются попытки применить методы управления рабочим органом по приведенным ускорениям непосредственно в мировой системе координат [18].

24.5.4. Управление рабочим органом

Непосредственное взаимодействие робота и окружающей среды в процессе сборки реализуется через его рабочий орган. С этой точки зрения вся механическая часть робота может рассматриваться как устройство позиционирования исполнительного органа. Большая часть сборочных операций представляет собой совмещение деталей с применением активной или пассивной адаптации. Рабочий орган характеризуется следующими параметрами: типом инструмента, типом обрабатываемой детали, положением и ориентацией объекта, силами и моментами реакции, параметрами захвата, массой объекта, геометрическими характеристиками объекта, трением между пальцами захвата и объектом, податливостью. В зависимости от конкретной сборочной операции для управления рабочим органом используются специальные системы управления, общая структура которых приведена на рис. 24.8. Управляющие задания обрабатываются программным интерпретатором.

24.5.5. Подсистема очувствления и обработки сенсорной информации

Подсистемы очувствления роботов классифицируются следующим образом.

А. Внутренние датчики:
(а) положения звена;
(б) скорости;
(в) ускорения;
(г) силомоментный на запястье;
(д) силомоментный на захвате.

Б. Внешние датчики:
(а) дальномерный;
(б) касания;
(в) геометрии (двух- или трехмерные);
(г) зрительные;
(д) обеспечения безопасности;
(е) специальные.

Внутренние датчики являются частью замкнутого контура управления движением по осям и должны выдавать данные с высокой частотой отсчетов. Внешние датчики имеют меньшее быстродействие и обрабатывают данные со скоростью, необходимой для обновления модели робота. Подсистема очувствления состоит из подсистем сбора и обработки данных. Подсистема сбора данных фиксирует отсчеты параметров процесса и формирует образ. Подсистема обработки идентифицирует образ и формирует структуры данных для системы моделирования среды.

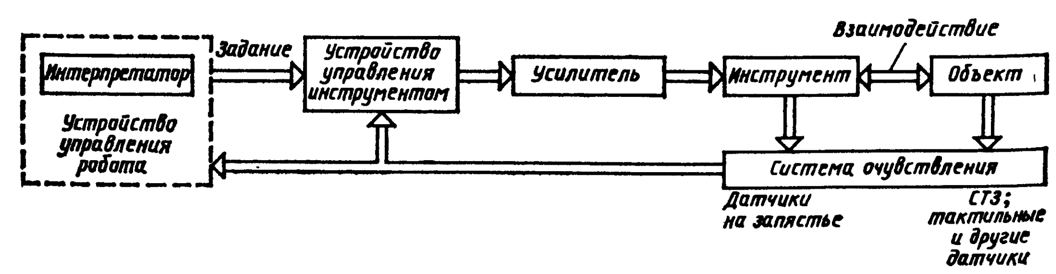


Рис. 24.8. Структурная схема системы управления исполнительным органом

24.5.6. Центральная система управления роботом

Как правило, структура центральной системы управления не зависит от типа робота. Она выполняет следующие операции: интерпретацию программы в реальном масштабе времени; оперативное планирование; декомпозицию заданий; планирование траекторий по данным подсистем очувствления; преобразование координат; управление рабочим органом; управление периферийными устройствами; управление подсистемами очувствления и обработка информации.

В функции центральной системы управления входят также распределение заданий и операций в мультипроцессорной среде и регулирование связей между отдельными процессорами. Выделяется несколько типов процессоров: арифметические с плавающей запятой, арифметические с фиксированной запятой, процессоры подсистем очувствления, логические, ввода/вывода.

Межзадачная связь осуществляется за счет взаимодействия отдельных процессоров. Наиболее важные из функций процессоров рассматриваются ниже.

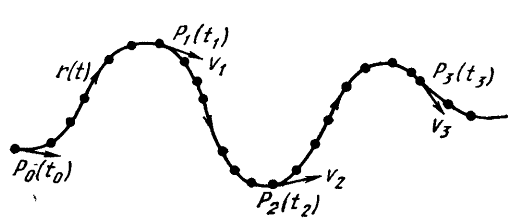


Рис. 24.10. Пример интерполированной траектории с равноотстоящими отсчетами (интервал 10 мс)

24.5.7. Планировщик траекторий

Планировщик траекторий представляет собой задание, определяющее траектории движения манипулятора с учетом данных, полученных от подсистем очувствления. Основные параметры траекторий определяются программой пользователя. С помощью базовых уравнений для координатных систем могут задаваться следующие типы перемещений: поточечные, прямолинейные, по заданным кривым с заданной скоростью, следящие за движущимся объектом, сборочные, с обходом препятствий, под управлением подсистемы очувствления.

В зависимости от выбранного типа перемещения исполнительного органа используются различные алгоритмы интерполяции. Типичными методами интерполяции являются следующие (рис. 24.9): линейная интерполяция, линейная интерполяция со сглаживанием изломов, интерполяция алгебраическими функциями (полиномами), интерполяция между изменяющими положение точ-

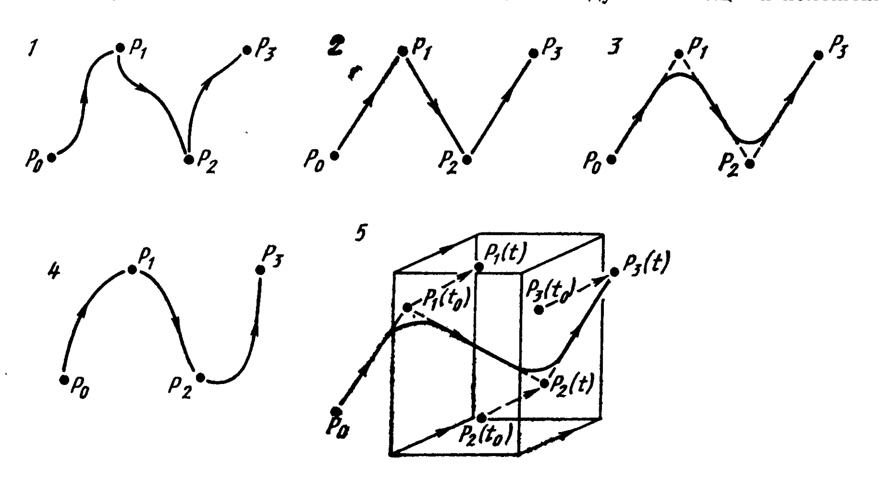


Рис. 24.9. Типы расчетных траекторий:
1 — планирование по точкам; 2 — линейная интерполяция; 3 — линейная интерполяция с сопряжением отрезков (по круговой, квадратической, кубической траекториям и т. п.); 4 — интерполяция полиномами; 5 — планирование траектории между перемещающимися во времени отрезками

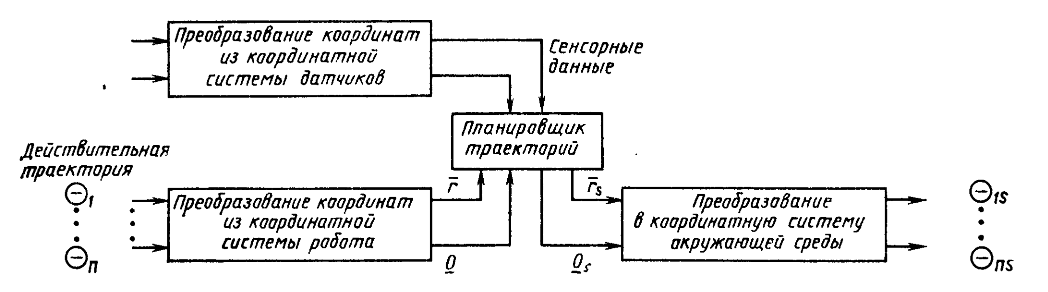


Рис. 24.11. Структура преобразования координат: $\bar{r}$ и $\underline{O}_S$ задают координаты и ориентацию рабочего органа

ками с использованием временных функций или градиентных стратегий.

В примере на рис. 24.10 генерация траекторий в мировой системе координат осуществляется с частотой 100 Гц.

24.5.8. Преобразование координат

В процессе движения для каждого из сочленений робота необходимо рассчитать его смещение в каждый момент времени (т. е. преобразовать мировые координаты в систему координат манипулятора). Одновременно производится обратная операция, позволяющая определить фактическое положение рабочего органа в мировой системе координат (рис. 24.11).

Для расчета траекторий движения рабочего органа с учетом данных подсистем очувствления необходимо иметь следующую информацию (рис. 24.12): положение и ориентация объекта, расстояния,

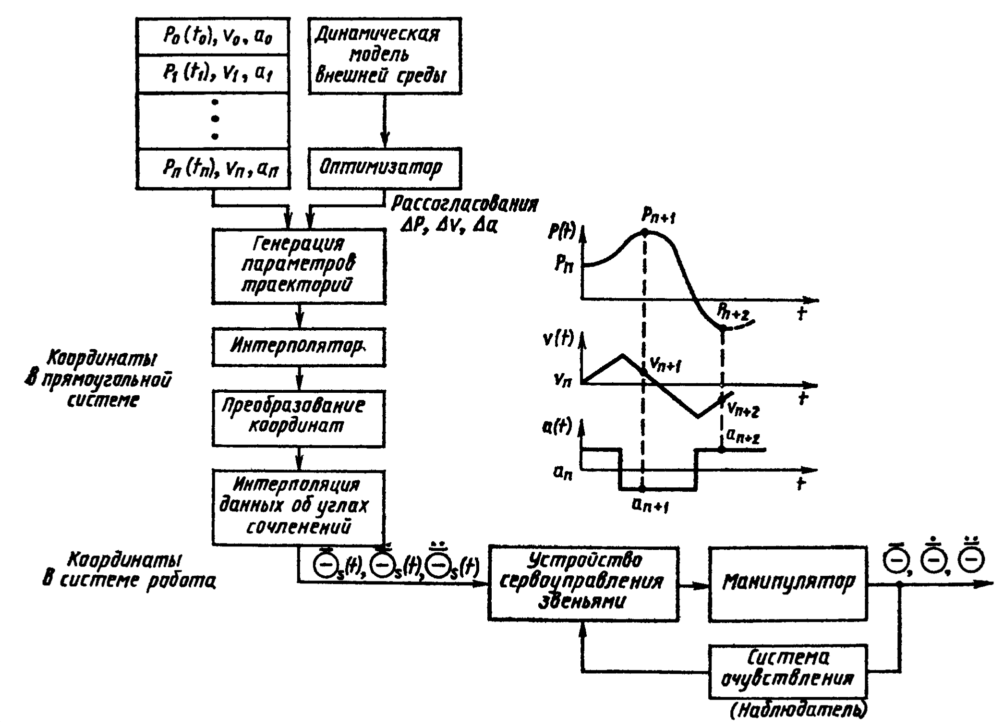


Рис. 24.12. Генерация данных о динамике движений робота

диаметры, форма объекта, маршрут движения объекта (положения и скорости), контуры.

24.5.9. Моделирование окружающей среды

Центральное устройство управления робота пользуется моделью окружающей среды в качестве исходных данных. Эта модель состоит из информационных структур, в которых отражены геометрические и физические соотношения между элементами сборочной производственной ячейки. Данные модели окружающей среды постоянно обновляются для того, чтобы в каждый момент иметь о ней следующую информацию: положение и ориентация всех объектов, данные о движущихся объектах (например, на транспортере), положение препятствий движению робота, данные об изменяющихся объектах (форма, масса), данные о положении и движении манипуляторов, транспортеров и станков.

Данные о состоянии внешней среды робота обрабатывает система моделирования. При обнаружении существенных изменений в среде блок принятия решения с помощью оптимизатора модифицирует программу обработки.

24.5.10. Модульная структура устройства управления робота

Все перечисленные выше задачи выполняются на различных иерархических уровнях управления [10]. С более высоких уровней данные передаются на более низкие уровни. Иерархия уровней управления, начиная с низшего уровня, приведена на рис. 24.13.

Управление приводами и рабочим органом (уровень 1). На этом уровне формируются сигналы для управления исполнительными механизмами привода всех сочленений робота. В соответствии с алгоритмами управления осуществляется управление всеми звеньями. Этот уровень управления выполняет только элементарные функции и сильно зависит от типа робота. Входными для него являются данные о траекториях сочленений, выраженные в системе координат сочленений.

Уровень преобразования координат (уровень 2). На этом уровне производится преобразование прямоугольной мировой системы координат, в которой заданы траектории движений, в систему координат сочленений манипулятора. Планируемая траектория зависит от конкретной конструкции робота.

Уровень 5 — Интерпретатор; Модель внешней среды; Идентификация
Уровень 4 — Оптимизатор; Динамические данные
Уровень 3 — Планировщик траекторий
Уровень 2 — Постпроцессоры
Уровень 1 — Устройства управления звеньями; Модуль управления; Модуль управления; Манипулятор; Рабочий орган; Периферийные устройства; Обработка сенсорных данных; Подсистема очувствления
Процесс сборки

Рис. 24.13. Иерархическая структура управления роботом в реальном времени

Уровень интерполяции траектории (уровень 3). На этом уровне выводятся уравнения преобразований координат для формирования непрерывной траектории в мировой системе координат. Входными данными на этом уровне управления являются параметры, определяющие условия, которым должна удовлетворять траектория (например, точки траектории, скорость перемещения). В зависимости от области применения используются различные алгоритмы интерполяции (квадратичной, кубической, круговой, полиномиальной, специальной). На этом уровне кинематика робота рассматривается в мировой системе координат.

Уровень управления траекторией (уровень 4). Центральное устройство управления робота представляет собой интерпретатор, который осуществляет оперативное планирование заданий и их декомпозицию. На этом уровне реализуются управление обработкой в реальном масштабе времени, синхронизация всей работы, распределение заданий. Для этого получаемые данные сравниваются с моделью внешней среды, используются подсистема моделирования и библиотека прикладных программ (например, управления рабочим органом), а также выполняется взаимодействие с уровнем интерполяции траекторий. На этом уровне производятся также оперативное планирование и диспетчеризация заданий для мультипроцессорной системы.

24.5.11. Требования к архитектуре ЭВМ

При проектировании и реализации системы управления роботом следует стремиться к следующим целям:

четкому разделению всех уровней управления;

модульности архитектуры системы за счет использования однородной вычислительной среды;

стандартизации интерфейсов между отдельными управляющими модулями (программными и аппаратными);

минимизации участия пользователя на всех уровнях управления;

стандартизации форматов данных и протоколов связей;

использованию многошинной системы связей, обеспечивающей параллельную передачу данных;

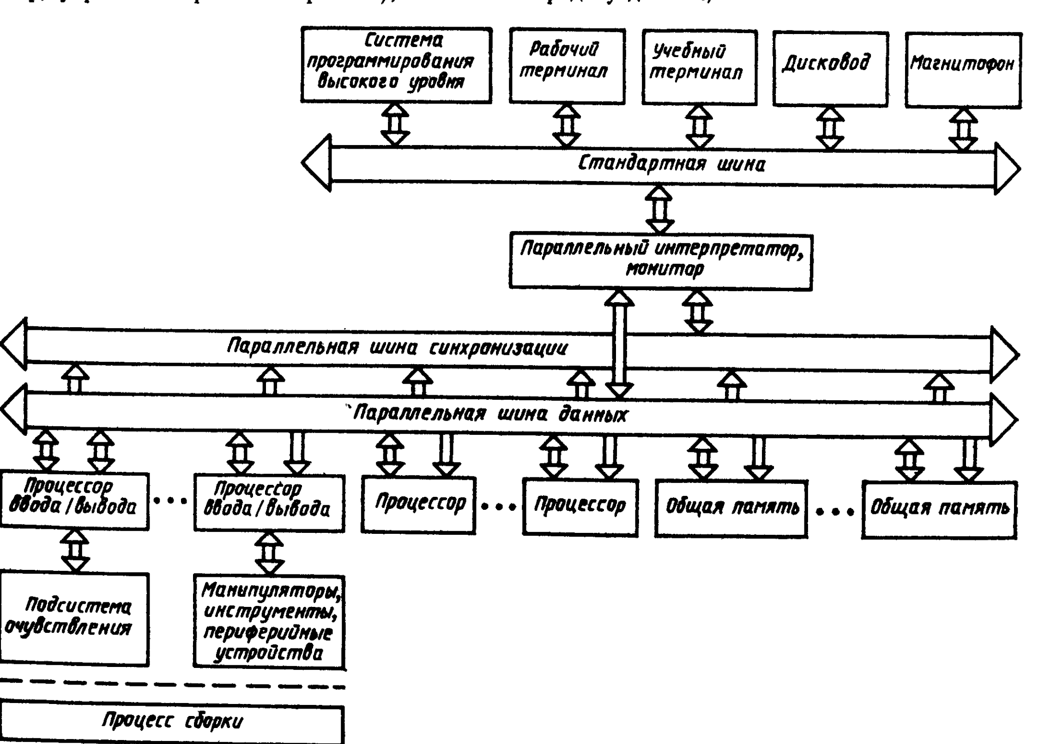


Рис. 24.14. Структура аппаратных средств многопроцессорной системы управления роботом

децентрализации системы управления;

обеспечению динамического изменения конфигурации системы.

Структура аппаратных средств системы представлена на рис. 24.14. В нее входят микропроцессоры и многошинная система связей для передачи данных и синхронизации. Система связей содержит специальные линии передачи сенсорных данных, данных о координатных системах и информационных структур, состоящих как из целых чисел, так и из чисел с плавающей запятой. В качестве большинства узлов используются 16-разрядные микро-ЭВМ с большим адресным пространством. Быстродействующие аппаратные средства (например, арбитры шин) обеспечивают бесконфликтный режим обмена. В системе предусмотрена возможность расширения без изменения существующих программных и аппаратных средств. Функции управления системой осуществляет система программирования на проблемно-ориентированном языке высокого уровня [19]. Возможны координированное управление несколькими манипуляторами и интеграция с САПР или экспертной системой.

24.6. Интеграция подсистем очувствления и системы управления

Технологическая гибкость сборочных роботов обеспечивается эффективным проблемно-ориентированным языком программирования, с помощью которого описываются действия робота и алгоритмы обработки сенсорных данных. Процесс сборки в большинстве случаев требует силомоментного взаимодействия и может быть описан в терминах взаимодействия рабочего органа (инструмента, захвата) и объекта. После компиляции исходных файлов интерпретатор инициирует выполнение в реальном масштабе времени заданий, осуществляющих управление, адаптацию и обработку сенсорных данных (см. рис. 24.4). При определенных манипуляциях с объектом используются СТЗ [20] и другие неконтактные датчики. В случае непосредственного взаимодействия с объектом необходимо измерять усилия и моменты, возникающие между ним и рабочим органом. При таком взаимодействии нужно регистрировать усилие захватывания, положение пальцев и ориентацию объекта в захвате. В следующем подразделе рассмотрена система управления захватом на базе микроЭВМ, которая обеспечивает приближение и захватывание объекта, а также измеряет усилия, приложенные к запястью манипулятора по шести степеням подвижности. Описываемый захват предназначается для легких роботов (например, ПУМА-600) и используется для сборки различных изделий. Управление заданиями осуществляется интерпретатором языка АЛ. Обсуждается встраивание системы датчик — захват в единую иерархическую систему управления роботом.

24.6.1. Устройство захвата

Конструкция захвата показана на рис. 24.15. Два параллельно расположенных кольца приводятся в движение двигателем постоянного тока через систему зубчатых колес. Пальцы сменные, захват мо-

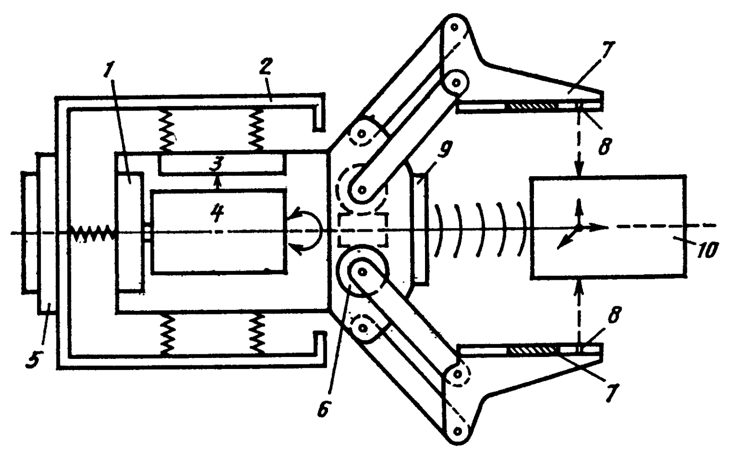


Рис. 24.15. Схема системы датчики — захват:

1 — датчик угловых приращений; *2* — силомоментный датчик; *3* — датчик усилий захватывания; *4* — двигатель; *5* — сочленение с кистью; *6* — потенциометр для измерения положения; *7* — пьезокристаллический датчик (микрофон); *8* — инфракрасный датчик; *9* — ультразвуковой датчик; *10* — объект

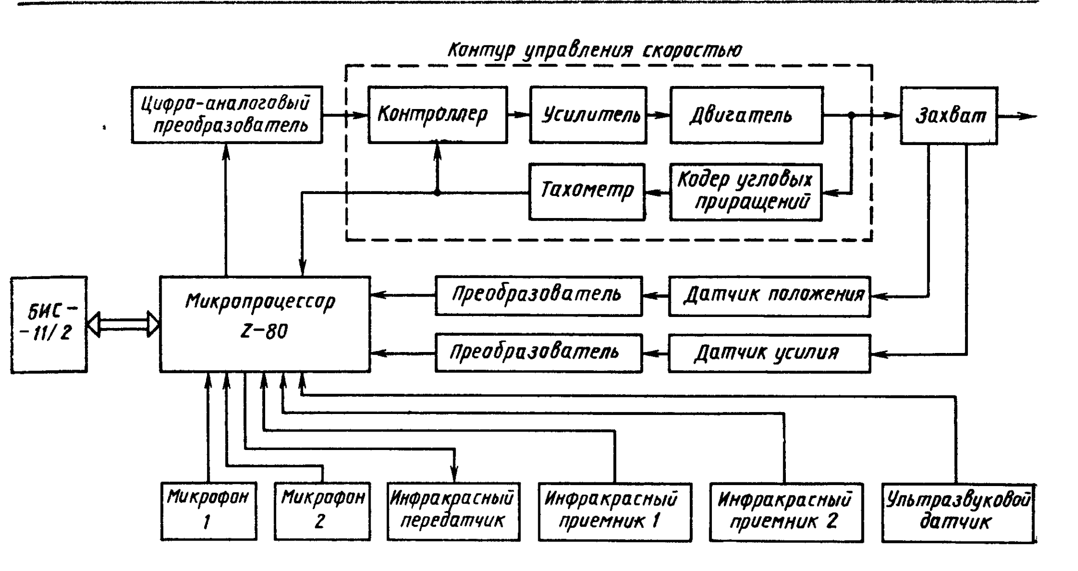


Рис. 24.16. Блок-схема обмена данными в системе датчики — захват

жет удерживать детали с определенным усилием как при сведении, так и при разведении пальцев. Траектория движения концов пальцев криволинейна (по радиусу). Это означает, что точка соприкосновения захвата с деталью меняет свое положение в зависимости от требуемого раствора (угла раскрытия захвата). Поэтому при захватывании объектов разного размера каждый раз необходимо вычислять положение пальцев захвата.

Для измерения раствора пальцев используется измерительный потенциометр. Максимальный раствор составляет 8 см, а максимальное эффективное усилие захватывания равно 30 Н. Управление захватом осуществляет микроЭВМ, взаимодействующая с центральной системой управления, которой она передает информацию о положении и скорости перемещения пальцев, значениях усилий захватывания, сенсорные данные, а также коды состояния. В номенклатуру операций захвата входят:

перемещение пальцев с заданной скоростью;

перемещение пальцев с заданной скоростью в заданное положение;

захватывание с ограничением усилий и моментов;

перемещение пальцев с заданной скоростью в заданное положение с приложением заданного усилия;

установка пальцев на заданном расстоянии от объекта (например, позиционирование захвата концентрично с объектом с помощью датчиков касания);

инициализация подсистемы очувствления (тактильных и неконтактных датчиков);

отключение системы очувствления;

передача сенсорных данных в устройство управления робота (система моделирования среды).

Для выполнения первых пяти операций необходима замкнутая система управления положением, скоростью и усилием захватывания. Положение захвата и развиваемые усилия задаются программно, а скорость — аппаратно. Для определения состояния объекта манипулирования используются как тактильные, так и неконтактные датчики (рис. 24.16).

24.6.2. Подсистема очувствления захвата

В подсистему очувствления захвата входят следующие датчики.

А. Контактные:

(а) силомоментные в запястье;

(б) силомоментные на пальцах;

(в) касания.

Б. Нетактные:

(а) дальномерный (ультразвуковой датчик);

(б) присутствия объекта между пальцами (инфракрасный датчик).

Конструкция датчиков и обработка формируемых ими данных рассматриваются ниже.

Силомоментный датчик в запястье. Для определения силомоментного вектора **при** взаимодействии рабочего органа и объекта используются эластомеханические устройства. Устройство силомоментного датчика запястья должно удовлетворять противоречивым требованиям. С одной стороны, он должен быть достаточно чувствительным, чтобы точнее измерять усилия, с другой стороны, он должен обладать достаточной механической жесткостью во избежание снижения точности позиционирования робота. Следует иметь в виду, что при работе такого датчика могут возникать погрешности, обусловленные взаимосвязанностью его отдельных чувствительных элементов. Типовой датчик позволяет определить все 6 составляющих силомоментного вектора, приведенного к запястью (три ортогональных составляющих усилия и три момента). Усилия и моменты измеряются косвенным путем (по деформации восьми пружин, прикрепленных к восьми парам тензометров). Для того, чтобы разложить измеренные значения по ортогональным осям локальной системы координат (связанной с захватом), необходимо выполнить умножение на соответствующие матрицы.

Описанный силомоментный датчик позволяет измерять усилия до 50 Н, моменты до 4,2 Нм с погрешностью менее 5 % (вызванной взаимодействием преобразователей). Рабочая частота отсчетов данных составляет 100 с$^{-1}$ (100 Гц). На рис. 24.17 приведена схема установки датчика на запястье.

Датчик усилия захватывания. Конструкция датчика, измеряющего усилия захватывания объекта, приведена на рис. 24.18. Заранее определенное усилие передается к пальцам через зубчатую передачу. Под действием сил противодействия двигатель, подвешенный на пружинах, перемещается вдоль оси z захвата. Деформация пружин,

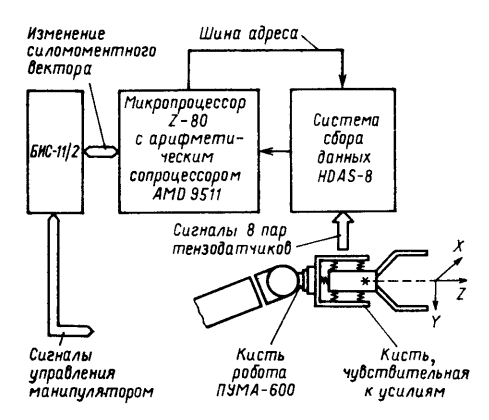


Рис. 24.17. Структура силомоментной системы очувствления кисти

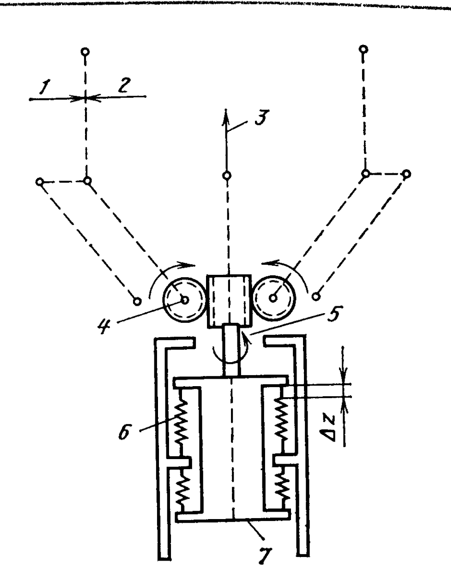


Рис. 24.18. Кинематическая схема измерения усилий захвата:

1 — усилие захвата; *2* — сила реакции; *3* — ось z; *4* — шестерня; *5* — момент, развиваемый двигателем; *6* — пружина; *7* — двигатель

пропорциональная приложенной силе, измеряется потенциометром. Соотношение между смещением z и развиваемым двигателем моментом M задается следующим уравнением:

$$az(t) + bz(t) + c \sin z(t)\,(d\,|z(t)| + r) = M,$$

где a, b, c, d — постоянные параметры; r — коэффициент трения. В соответствии с этим уравнением и осуществляется управление усилием захватывания, которое реализуется микроЭВМ по заданному алгоритму.

Датчик касания. Для того, чтобы определить момент касания объекта пальцами захвата, а также обнаружить возможное проскальзывание объекта после захватывания, используются пьезокристаллические элементы, работающие в режиме микрофонов. Для устранения шумов внешней среды и двигателя кристаллы изолированы резиновой прокладкой. Датчик генерирует достаточно различимые сигналы при воздействии объектов различных размеров, изготовленных из разных материалов. Он способствует позиционированию захвата по центру объекта. С его помощью определяются не только проскальзывание объекта, но и столкновения с другими объектами.

Количественные измерения вектора касания (расположение точек касания), площади касания или вектора проскальзывания возможны только при использовании нескольких пьезоэлементов, расположенных

в виде решеток. Для тех же целей можно использовать и другие материалы (например, «искусственную кожу»). В настоящей главе они не рассматриваются, так как обладают значительным гистерезисом и большой нелинейностью.

Ультразвуковой датчик. С помощью ультразвукового датчика можно определять расстояние до объекта по вертикали. Этот преобразователь работает и как передатчик, и как приемник. Измерения производятся путем передачи на ультразвуковых частотах импульсных последовательностей.

Такими датчиками обнаруживаются объекты с различной отражающей способностью поверхности. С помощью быстродействующих счетчиков измеряется временной интервал между передачей и приемом импульса. Этот интервал используется для определения расстояния до объекта. Высококачественные датчики обладают разрешающей способностью до 1 мм. Минимальное измеряемое расстояние зависит от конструкции датчика. Это ограничение связано с конечным временем, требуемым для генерации передаваемой импульсной последовательности, и конечным временем переключения из режима передачи в режим приема. Применяя два преобразователя (один в качестве передатчика, другой — приемника) и фиксированную частоту повторения импульсов (зависит от свойств обнаруживаемого объекта), можно повысить как разрешающую способность, так и минимальное измеряемое расстояние. Угол излучения ультразвука ограничивается конусом, выполненным из пенистой резины, и составляет менее 1,5°. Это позволяет выполнять сканирование поверхности объектов.

Датчик присутствия объекта между пальцами захвата. Для фиксации наличия объектов между пальцами захвата используются два инфракрасных передатчика, генерирующих модулированные сигналы. Рядом с каждым инфракрасным излучателем установлено по два приемника (рис. 24.19). Если между пальцами захвата находится объект, световой поток прерывается и отражается. Если отраженный световой поток попадает в оба приемника данного передатчика (для этого поверхности объекта должны иметь хорошие отражающие свойства), поверхность объекта расположена параллельно пальцам захвата. Если свет попадает только в один приемник, можно определить угол, на который следует повернуть захват, чтобы поверхность оказалась параллельной пальцам. Чем ближе к пальцу расположена поверхность объекта, тем выше чувствительность приемника. Однако при очень малом расстоянии сигнал в приемник может вообще не попасть. Это означает, что такой датчик можно использовать в качестве неконтактного датчика близости объекта. Изменяя расположение приемников и угол излучения передатчика, можно регулировать чувствительность датчика и его рабочий диапазон по удалению. Применяя большее число приемников для одного передатчика, можно улучшить характеристики датчика, поскольку параметры приемников не зависят от интенсивности отраженного сигнала.

Управление захватом. Декомпозицию управляющих заданий для захвата и его датчиков осуществляет интерпретатор языка АЛ, функционирующий на ЭВМ центрального устройства управления. На нижнем уровне управления (в микроЭВМ) выполняются только стандартные программы, которые хранятся в программируемых ПЗУ (табл. 24.4). После первичной загрузки программ микроЭВМ находятся в состоянии ожидания поступления входных или запроса выходных данных. Если необходимо выполнить операцию захвата, будут инициированы соответствующие управляющие программы. Относительно центральной системы управления периферийные микроЭВМ выступают как модули ввода/вывода. Они не требуют дополнительных программных средств. Их архитектура достаточно проста, она включает локальный монитор, допускающий модификацию программ пользователем с видеотерминала.

Рис. 24.19. Способ распознавания объекта, находящегося между пальцами захвата:
а — расположение инфракрасных передатчиков и приемников; б, в — отражение сигнала параллельной и непараллельной поверхностями; г — расположение преобразователей при определении приближения объекта

24.4. Список операторов управления системой датчик — захват

Команда	Выполняемая функция
POS	Инициирует алгоритм управления положением и скоростью
FORCE	Инициирует алгоритм управления усилием
VEL	Преобразует параметры для управления скоростью
SENS ON I	Инициирует работу микрофона и инфракрасных диодов
SENS ON II	Инициирует работу силочувствительной кисти
SENS ON III	Инициирует работу ультразвукового датчика
SENS OUT I	Прерывает работу микрофона и инфракрасных диодов
SENS OUT II	Прерывает работу силочувствительной кисти
SENS OUT III	Прерывает работу ультразвукового датчика
FORCEPOS	Инициирует примитивы *SENSON* I и *POS*
STOP	Экстренно останавливает движение пальцев
INF I	Передает данные о состоянии захвата из таблицы сенсорных данных в систему управления роботом
INF II	Передает данные о силомоментном векторе в систему управления роботом
INF III	Передает данные от ультразвукового датчика в систему управления роботом
POS JU	Калибрует датчик положения
FORCE JU	Калибрует датчик усилия захватывания
WRISTJU	Калибрует силомоментный датчик запястья

Подсистема очувствления захвата состоит из нескольких датчиков, позволяющих приблизить захват к объекту и зафиксировать объект в пальцах. Силомоментное очувствление запястья упрощает манипулирование объектами (например, в процессе сборки). Для специальных применений (в особенности — в системах технического контроля) могут потребоваться несколько тактильных и оптических датчиков, расположенных в узлах сетки «искусственная кожа». Использование распределенной системы обработки данных обеспечивает быстродействие, достаточное для работы в реальном масштабе времени.

Рассмотренные модульные системы управления захватом и его очувствления могут интегрироваться в общую систему управления роботом. При добавлении дополнительных датчиков или смене захвата стандартные программы управления заменяются.

24.6.3. Измерение расстояний лазерным дальномером

Для определения расстояний в диапазоне от 10 см до 10 м в промышленных робототехнических системах используются три различных способа: измерения фазового сдвига, определения временной задержки и триангуляции. Во всех трех случаях используются лазерные сканирующие системы. Эти системы имеют жесткие ограничения: большое ослабление интенсивности отраженного луча (до 100 дБ), низкое отношение сигнал/шум (например, из-за фотонного шума) и низкую скорость сканирования (в отдельных устройствах — до 500 мс/элемент).

Лазерные сканирующие системы, работающие по принципу измерения фазового сдвига (косвенного измерения временного интервала), подробно рассмотрены в работе [21]. Отметим лишь, что максимальная скорость сканирования, достижимая в таких системах, составляет около 25 мс/элемент. Современные лазерные системы управляются вычислительными машинами и не используются в автономном варианте, как предполагается в работе [21].

Одним из наиболее многообещающих способов измерения расстояний является непосредственное измерение времени распространения светового луча. Данные о расстоянии и интенсивности могут быть полу-

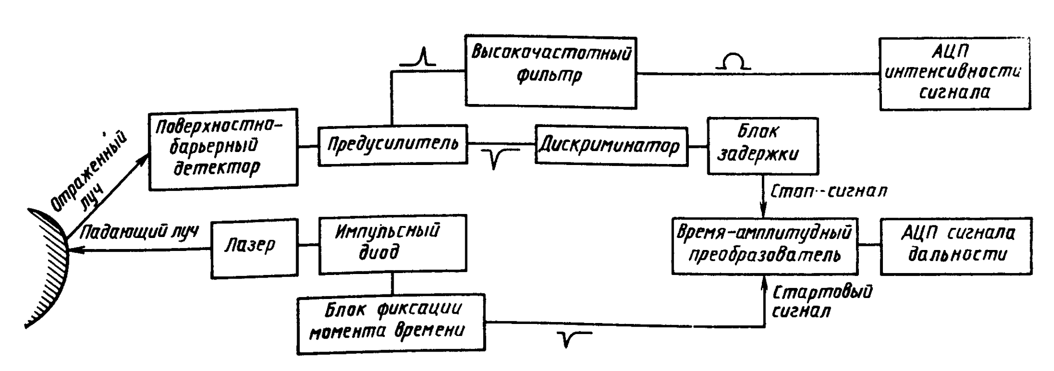


Рис. 24.20. Структурная схема лазерного дальномера с непосредственным измерением времени задержки

чены, например, в течение 1 мкс. Однако для расстояния 1 м время распространения света составляет 3,3 нс. Это означает, что для обеспечения разрешающей способности по расстоянию примерно 5 мм измерительный прибор должен обладать разрешающей способностью по времени порядка 16,5 пс. В настоящее время единственный способ, отвечающий этим требованиям, — временная спектроскопия (измерение совпадений), которая используется в ядерной физике и физике высоких энергий. Для измерения временного интервала между стартовым и конечным сигналами используются время-амплитудные преобразователи (ВАП) [22]. Разрешающая способность этих приборов по времени определяется шириной полного выделяемого временного спектра на уровне половинной амплитуды. В настоящее время с помощью ВАП достигаются разрешающие способности до 10 пс. На рис. 24.20 приведена структурная схема лазерного дальномера, работающего по принципу непосредственного измерения задержки светового луча.

В качестве источника света в дальномерной системе используется импульсный лазерный диод мощностью 50 мВт. Такой же диод используется для формирования стартового светового импульса. Блок фиксации момента времени формирует короткий импульс стандартной длительности и формы, которые не зависят от параметров входного сигнала. Выходной импульс блока запускает ВАП. Отраженный луч воздействует на кремниевый детектор с поверхностным барьерным слоем, в результате чего в данном слое возникают временные флуктуации эмитируемых электронов (так же как в фотоумножителе). Выходной сигнал этого детектора усиливается и разделяется на два канала. В одном канале сигнал проходит фильтр высоких частот, усиливается и преобразуется в сигнал, соответствующий «интенсивности». Сформированный сигнал с плоской вершиной легче преобразовать в цифровой (на 8-разрядном АЦП), чем исходный сигнал, имевший форму пика.

В другом канале, предназначенном для определения дальности, сигнал поступает на дискриминатор, задерживается и поступает на ВАП, останавливая его. Выходной сигнал ВАП по времени (с разрешающей способностью не хуже 10 пс) точно коррелирован с интервалом между стартовым и стоп-сигналом. Сигнал с выхода ВАП преобразуется в цифровой код с помощью 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя.

Наиболее сложной проблемой в этом методе дальнометрии является очень большой динамический диапазон интенсивности отраженного луча (порядка $10^5 - 1$). Разрешающая способность по времени существенно зависит от этой интенсивности: чем она выше, тем выше разрешающая способность. В экспериментах по ядерной физике динамический диапазон ограничен значениями порядка $100 - 1$.

Основные компоненты системы непосредственного измерения — предусилитель, дискриминатор и ВАП — эффективно функционируют при высокой интенсивности отраженного луча и ее узком динамическом диапазоне. К сожалению, оба эти ограничения невозможно выполнить в производственных условиях. Первые результаты, полученные экспериментальным путем в реальных условиях, показывают, что достижимые для метода непосредственного измерения временного интервала в лазерных дальномерах значения разрешающей способности по времени составляют порядка 5 нс (разрешающая способность по дальности около 1,5 м). Следовательно, этот метод измерения дальностей пригоден только для лабораторных экспериментов

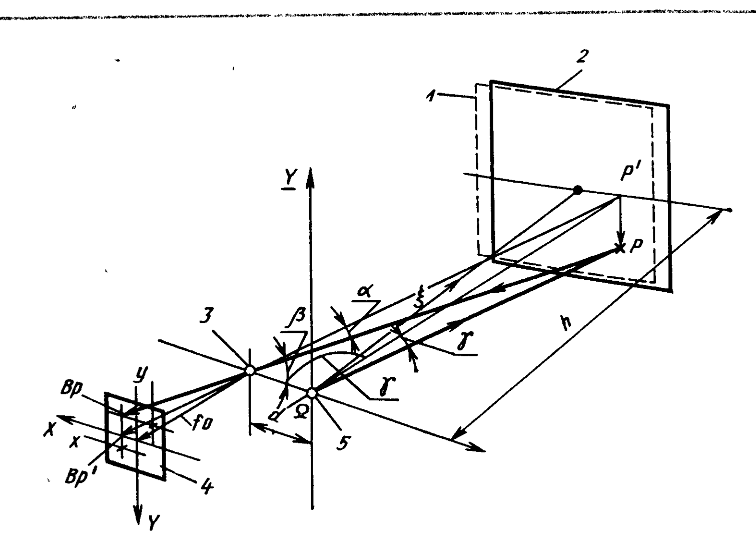


Рис. 24.21. К принципу действия триангуляционной дальнометрической системы:
1 — поле зрения камеры; *2* — область сканирования лазера; *3* — центр камеры; *4* — плоскость изображения; *5* — центр лазера

(например, в условиях идеального зеркального отражения и постоянной температуры).

На рис. 24.21 представлен принцип действия триангуляционного лазерного дальномера. Одна из камер стереопары заменена лазерным источником света. Лазером управляет микроЭВМ. В работе [23] предлагается использовать 64 синхронизированных микропроцессора для управления лазером и обработки данных. Информация о дальности может быть получена на основании измерений угла отклонения δ лазерного луча по горизонтали (или угла γ по вертикали), базы стереосистемы d, фокусного расстояния f_0 объектива камеры и координат x и y в плоскости изображения, соответствующих углам падения α и β отраженного луча.

Если использовать параллельную проекцию (вычислять расстояние h от базовой линии до точки p'), то потребуется всего два угла из четырех (например, β и δ). Расстояние h вычисляется по формуле

$$h = \frac{d}{\operatorname{ctg} \delta + x/f_0}.$$

Разрешающая способность по расстоянию

$$\Delta h\,[\Delta h(x,\ \delta) = h(x + x_{\min},\ \delta + \delta_{\min}) - h(x,\ \delta)]$$

в линейной аппроксимации может быть определена по формуле

$$h = (h^2/d)\,x\left(-\frac{x_{\min}}{f_0} + \frac{f_0 \delta_{\min}}{\sin^2 \delta}\right).$$

Здесь $x_{\min}$ — минимальное различимое расстояние по оси x в плоскости изображения; $\delta_{\min}$ — минимальное измеряемое значение угла отклонения в горизонтальной плоскости. Оптимальное значение разрешающей способности достигается, когда расстояние h мало, база системы d велика, угол δ равен 90°, а величины $x_{\min}$ и $\delta_{\min}$ малы.

Приводя данные об экспериментальных результатах, следует отметить, что в такой системе достигается довольно высокая разрешающая способность порядка 0,25 мм на расстоянии 1 м. Время, требуемое для оценки дальности в каждой точке, может быть доведено до 0,5 мкс (при использовании линейки ПЗС и аппаратном умножении).

Метод лазерного сканирования часто используется совместно со структурированным освещением (проекцией световой линии или сетки). Но в этом случае должны быть заранее известны форма и ориентация объекта. Только в этом случае каждой точке объекта можно поставить в соответствие точку на изображении и определить расстояние до нее. Если это требование не выполняется, указанный метод можно использовать только для грубой классификации объектов, а измерение абсолютных значений расстояния невозможно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bonner, S. and Kang, G., A Comparativie Study of Robot Languages, *Computer*, December 1982.
2. Mujtaba, S. and Goldmann, G., *AL User's Manual*, Stanford University, Stanford, California, 1979.
3. Brooks, R. A., Symbolic Error Analysis and Robot Planning, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 1, No. 4, 1982, pp. 29—67.
4. Kinnucan, P., Flexible System Forges Turbine Blades, *High Technology*, June 1983, pp. 20—22.
5. Kempf, K. G., Artificial Intelligence in Robotics, Tutorial on Artificial Intelligence, IJCAI, Karlsruhe, 1983.
6. Duff, M. and Levialdi, S., Eds., *Languages and Architectures for Image Processing*, Academic Press, 1981.
7. *RAIL Reference Manual AUTOVISION*, Automatix Inc., Burlington, Massachusetts, 1981.
8. Binford, T., et al., Exploratory Study of Computer Integrated Assembly Systems, Progress Report 4, Stanford University, Stanford, California, 1977.
9. Stute, G. and Wörn, H., Mehrprozessorsteuersysteme für Industrieroboter, Proceedings of the 8th ISIR, Stuttgart, 1978.
10. Albus, J., Barbera, A., and Fitzgerald, M., Hierarchical Control for Sensory Interactive Control, Proceedings of the 11th ISIR, Tokyo, 1981.
11. DIN 66264: Mehrprozessor-Steuersystem für Arbeitsmaschinen (MPST), Beuth-Verlag, Berlin, 1981.
12. Luh, J. Y. S., Walker, M. W., and Paul, R. P. C., Resolved-Acceleration Control of Mechanical Manipulators, *IEEE Transactions on Automatic Control*, No. 3, June 1980, pp. 468—474.
13. Freund, E. and Hoyer, H., Das Prinzip nichtlinearer Systementkoppelung mit der Anwendung auf Industrie-roboter, Regelungstechnick, No. 28, Jahrgang, Heft 3, 1980, (in German).
14. Paul, R. C., Modelling Trajectory Calculation and Servoing of a Computer Controlled Arm, Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, California, A. I. Memo 177, September 1972.
15. Pieper, D. L., The Kinematics of Manipulators under Computer Control, Ph. D. dissertation, Stanford University, 1968.
16. Horn, B. K. P. and Raibert, M. H., Configuration Space Control, Technical Report AI-M-458, MIT, Artificial Intelligence Laboratory, Cambridge, Massachusetts, 1978.
17. Paul, R., et al., Advanced Industrial Robot Control Systems, Second Report, School of Electrical Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, July 1979.
18. Chi-Haur Wu, Paul, R., Resolved Motion Force Control of Robot Manipulator, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, No. 3, June 1982.
19. Blume, C., A Structured Way of Implementing the High Level Programming Language AL on a Mini- and Microcomputer Configuration, Proceedings of the 11th ISIR, Tokyo, 1981, pp. 663—674.
20. Rembold, U., et al., A Very Fast Vision System for Recognizing Parts and Their Location and Orientation, Proceedings of the 9th ISIR, Washington, 1979, pp. 265—280.
21. Nitzan, D. et al., The Measurements and Use of Registered Reflectance and Range Data in Scene Analysis, *Proceedings of IEEE*, Vol. 65, No. 2, 1977, pp. 206—220.
22. Knoll, G. F., *Radiation Detection and Measurement*, Wiley, New York, 1979.
23. Levi, P., et al., ROVIKA: A Multiprocessor-Based Robot Vision System at the University of Karlsruhe, Proceedings of the 3rd Symposium on Microcomputer and Microprocessor Applications, Budapest, 1983, pp. 588—597.

Часть 5
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИКЛАДНЫХ СИСТЕМ: ИНТЕГРАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

Глава 25
ПРОЕКТИРОВАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Л. А. Хаутау, фирма «Джи-Эм-эф роботикс», г. Троя, шт. Мичиган
Ф. ДиПьетро, фирма «Дженерал моторс»

25.1. Введение

Мне приятно отметить вклад Л. Хаутау в создание настоящего справочника *. Я приветствую идею такого издания, посвященного робототехнике — отрасли, наилучшим образом отражающей стремление к будущему.

Международная конкуренция и низкая производительность труда привели к застою в развитии промышленного производства. Например, в США практически не выпускается кино-, теле- и фотоаппаратура, значительно отставание в электронике, производстве стали и в автомобильной промышленности: каждый третий из продаваемых сегодня в США автомобилей сделан в Японии. Хотя в некоторых отраслях еще идет поиск путей восстановления утраченных позиций, фирма «Дженерал моторс» и другие автомобилестроительные фирмы уже предпринимают энергичные меры в борьбе за рынки сбыта.

Существенной частью разработанной этими фирмами стратегии является роботизация производства. Она должна привести к увеличению производительности, повышению качества выпускаемой продукции и снижению ее себестоимости. Безусловно, роботы — это не панацея от всех бед. Но предполагается, что их использование поможет решить большую часть задач. Одной из причин столь благоприятного отношения к роботам не только со стороны организаторов производства, но и широких слоев населения (включая рабочих), является понимание того, что роботы позволяют «приблизить будущее».

Они экономичны, высокопроизводительны, обладают технологической гибкостью, обеспеченной возможностью перепрограммирования. Короче говоря, без них невозможно выстоять в конкурентной борьбе.

Поэтому я и считаю, что робототехника — это шаг в будущее. Сегодня это единственная отрасль, в которой США могут сохранить технологическое первенство.

Достигнуть этого можно только тогда, когда информация о самых современных достижениях будет быстро доходить до всех, работающих над решением важных задач робототехники.

Издания типа настоящего справочника призваны служить каналами передачи такой информации. Написанная Л. Хаутау глава о проектировании роботизированных производственных систем содержит сведения о современном состоянии дел в этой отрасли робототехники.

* Введение написано Ф. А. ДиПьетро.

25.2. Анализ выпускаемых изделий

При проектировании роботизированной производственной системы наиболее эффективен системный подход. Для разработки стратегии роботизации инструмент, технологический процесс и программу производства необходимо рассматривать в комплексе.

Проектирование системы с высокой степенью автоматизации и роботизации невозможно проводить по частям. Изделие и технологический процесс должны рассматриваться с точки зрения достижения наибольшей эффективности производства. Результатом такого системного подхода может явиться тщательно продуманный проект автоматизированной системы (рис. 25.1). Но любая роботизированная система — это сочетание подсистем, образующих большой, полностью автоматизированный комплекс автоматизированных участков, снабженных линиями подачи и питающими устройствами (в [1] описан альтернативный подход к данному вопросу).

Автору хотелось бы разрушить представление о проектировании роботизированной системы как о чересчур сложном и таинственном процессе. Любое проектирование должно начинаться с анализа изделия.

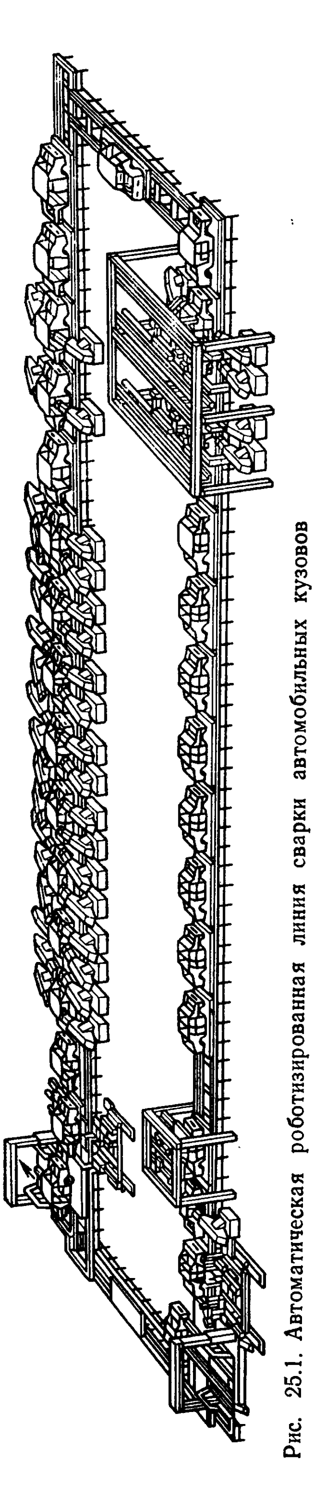


Рис. 25.1. Автоматическая роботизированная линия сварки автомобильных кузовов

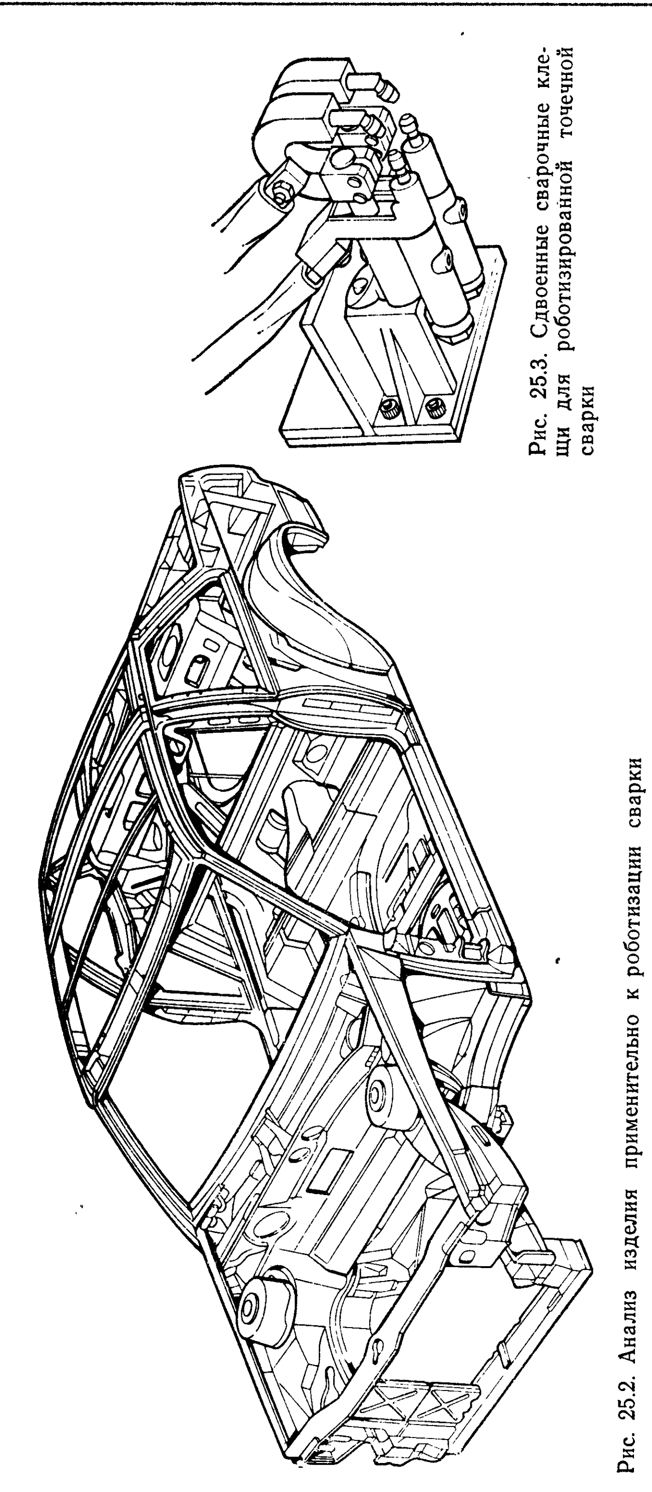


Рис. 25.2. Анализ изделия применительно к роботизации сварки

Рис. 25.3. Сдвоенные сварочные клещи для роботизированной точечной сварки

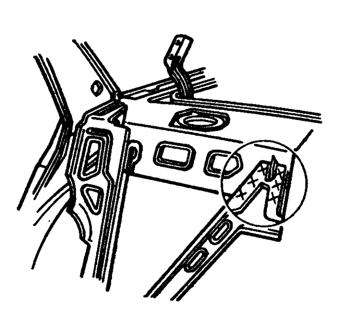


Рис. 25.4. Типичное место сварки: соединение элемента жесткости спинки заднего сиденья и панели заднего окна. Не рекомендуется роботизировать точечную сварку в глубине кузова из-за трудности подвода автоматизированных сварочных головок

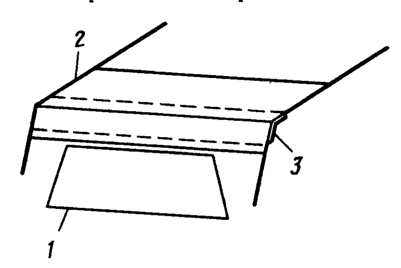


Рис. 25.5. Более удачная конструкция и способ изготовления элемента жесткости спинки заднего сиденья. Для достижения требуемой жесткости следует использовать армирование; армирование может выполняться как отдельная операция; стенка багажника может входить в сборочный узел заднего сиденья:

1 — стенка багажника; *2* — панель заднего окна; *3* — элемент жесткости

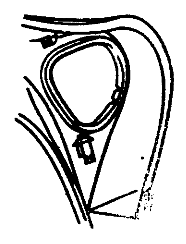


Рис. 25.6. Монтаж мелких элементов на примере зажимов крепления топливного бака. Сборка подобных конструкций представляет значительную сложность.

В настоящей статье этим изделием является кузов автомобиля (рис. 25.2). Уже при конструировании кузова необходимо ориентироваться на специфику его изготовления

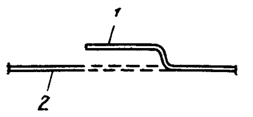


Рис. 25.7. Вариант конструкции, позволяющий отказаться от монтажа мелких деталей:

1 — выступающий элемент; *2* — основная панель

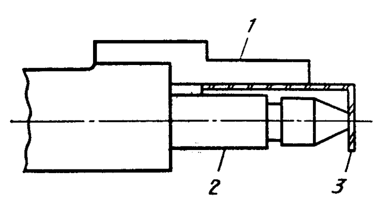


Рис. 25.8. Комбинированный рабочий орган робота (входящее в него зажимное приспособление позволяет исключить операцию подачи деталей). Форма нескольких мелких деталей должна обеспечивать возможность их захватывания одним приспособлением, что позволяет автоматизировать подачу деталей:

1 — зажимное приспособление; *2* — сварочная головка; *3* — привариваемая деталь небольшого размера

в условиях высокоавтоматизированного роботизированного производства.

Например, следует тщательно проанализировать требования к конструкции соединений, ведь именно от них зависит эффективность сборочных операций. Для примера рассмотрим соединение внутренней и внешней панелей на передней стойке кузова. Традиционно подобные соединения разрабатывались исходя из производственных условий и требований заказчика. Теперь, когда автоматизированная сборка используется очень широко, приходится дополнительно учитывать специфику ее применения.

Примером такого подхода является разработка сдвоенного сварочного аппарата (рис. 25.3), рассчитанного на установку на манипуляторе робота. Но для полной реализации преимуществ в производительности этого автомата следует сгладить кромки кузова. Это позволит массивному сдвоенному автомату быстро перемещаться вдоль всей обрабатываемой поверхности. В противном случае отслеживание всех изгибов приведет к потере драгоценных секунд и, следовательно, к снижению производительности.

Необходимо подчеркнуть, что в некоторых случаях при роботизации операций рекомендуется пересмотреть последовательность выполняемых действий. В примере, приведенном на рис. 25.4, выполнение свар-

ки требует введения сварочного автомата глубоко внутрь кузова. В случае отказа это может привести к большим потерям времени, так как значительная часть манипулятора робота окажется труднодоступной.

Избежать этого можно путем пересмотра конструкции кузова и введением подготовительной операции роботизированной сборки, при которой будут выполняться те же действия, но без угрозы остановки линии. Для усиления заднего сиденья следует применить отдельную операцию армирования (рис. 25.5). Она же позволяет отказаться от точечной сварки распорки стенки багажника, расположенной глубоко внутри кузова.

При конструировании также рекомендуется избегать мелких деталей, усложняющих сборку (рис. 25.6) и повышающих затраты (за счет устройств подачи). Желательно, чтобы эти детали были сформированы непосредственно на основных панелях кузова (рис. 25.7). На рис. 25.8 приведен пример конструкции рабочего органа робота, предназначенного для захватывания и сварки небольших деталей. Тем не менее в большинстве случаев роботизированная сварка небольших по размеру деталей затруднительна.

25.3. Анализ технологического процесса и проектирование системы

Рассмотрим варианты организации технологического процесса, позволяющие наиболее эффективно использовать возможности роботов. Наиболее удобные для автоматической сварки узлы кузова — дверной проем, заднее боковое окно, передняя и задняя кромки передней и средней стоек. Сварка заднего бокового окна обычно выполняется одним рабочим при помощи ручного сварочного аппарата. Анализ операции показывает, что ее роботизация даст выигрыш во времени (рис. 25.9 и 25.10).

25.3.1. Анализ технологического процесса

При анализе операции технолог должен быть готов к тому, чтобы пересмотреть организацию технологического процесса и (или) изменить конструкцию кузова для повышения эффективности робототехнического комплекса. При выполнении операции, требующей поворота сварочной головки на угол порядка 270°, обнаруживается, во-первых, что последняя ось робота является самым слабым звеном (по очевидным конструктивным причинам), во-вторых, что кабели сварочной головки перекручиваются более допустимого, серьезно осложняя эксплуатацию. В конечном итоге необходимо решить три задачи: сбалансировать разницу в длительности рабочих циклов (в оставшееся время один робот может выполнять часть работы другого, например робота, обрабатывающего контур дверного проема); ограничить критические моменты по некоторым осям; устранить чрезмерное перекручивание кабеля сварочной головки.

Эти задачи легко решить, меняя содержание операций.

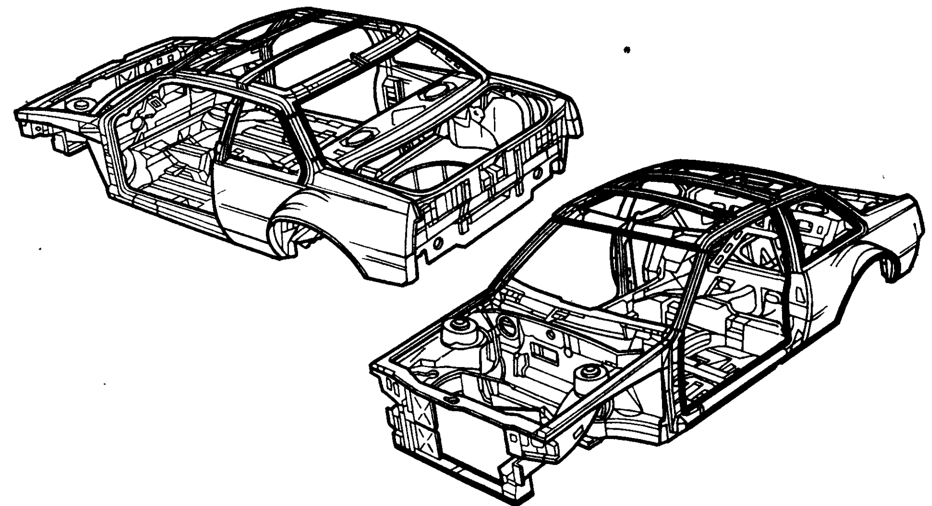


Рис. 25.9. Кромки кузова, вдоль которых планируется выполнять роботизированную сварку

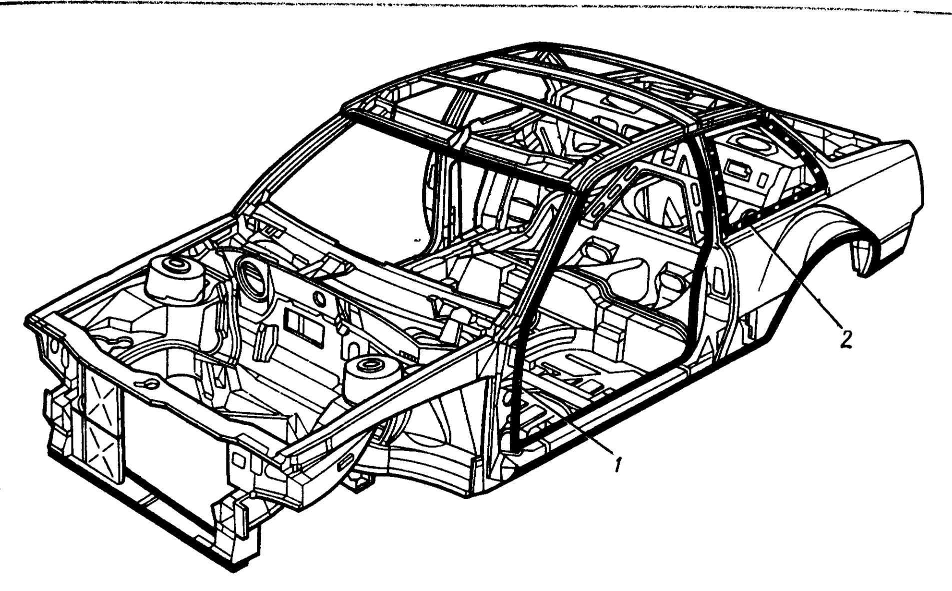


Рис. 25.10. Типовые затруднения, возникающие при роботизации сварки контура дверного проема и заднего бокового окна:

1 — общая длина кромки слишком велика для прохода за одну операцию; *2* — сварка по такому контуру требует перекручивания кабелей на 270°

Скажем, сварка части бокового заднего окна и части передней стойки кузова может выполняться одним роботом. Первый робот может приварить переднюю стойку кузова (рис. 25.11, штриховая линия), переместиться к заднему боковому окну и сварить его переднюю и нижнюю кромки. Второй робот выполняет сварку верха порога и передней части средней стойки за одну операцию. Третий робот сваривает заднюю кромку бокового окна, затем разворачивается для обработки боковой кромки заднего окна.

Перекручивания кабелей можно избежать, если производить сварку в следующем порядке: сначала перемещаться вниз

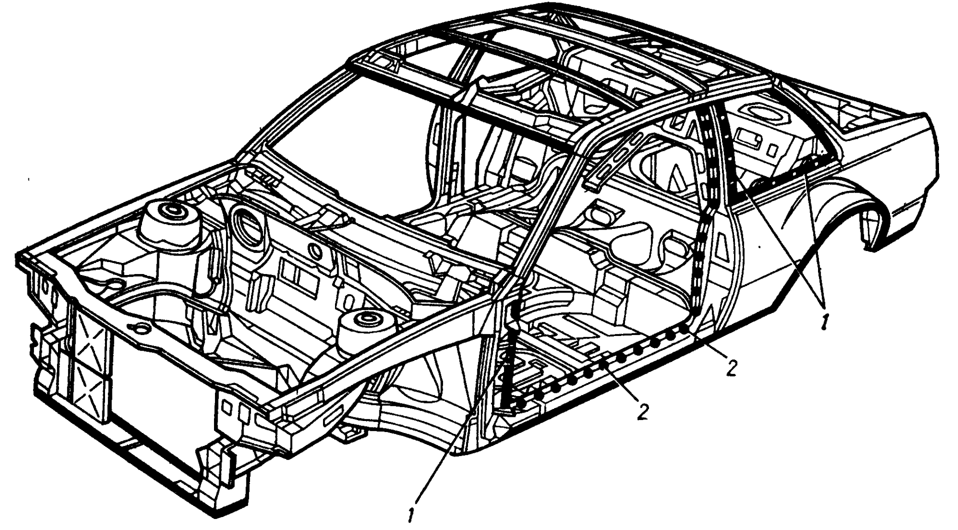


Рис. 25.11. Изменение технологии сборки

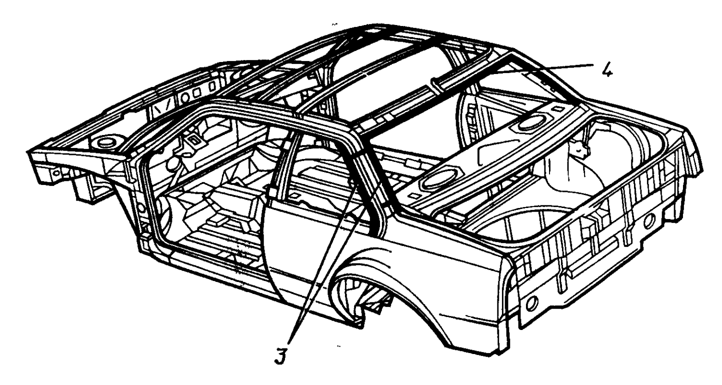


Рис. 25.12. Изменение технологии сборки

вдоль передней стойки, затем к передней и нижней частям окна. Хотя выполнение сварки одним роботом по всему контуру окна и упрощает движения робота, но, как было показано выше, приводит к перекручиванию кабелей сварочного автомата. На обработку дверного проема с помощью одного робота (см. рис. 25.11, пунктир) уходит слишком много времени. После разделения этой операции отпала необходимость в дополнительном роботе.

С другой стороны, сварка задней кромки крыши кузова (рис. 25.12) независимо от остающегося неиспользованным времени должна выполняться как отдельная операция. Это дает возможность сочетать сварку боковой кромки заднего окна со сваркой задней кромки бокового окна (операция 3). Роботу сложно добраться до противоположной стороны кузова, не повредив при этом его тонкую гладкую кромку. Напомним, что в этот момент кузов скреплен только предварительной точечной сваркой, и его форму легко нарушить. Следовательно, для этой операции 4 следует использовать отдельную сварочную головку, держатель, подвод кабеля и особый режим сварки.

25.3.2. *Краткий обзор типов роботов*

При планировании робототехнической системы технолог должен знать кинематику (базовую геометрию) роботов различных типов. Приведенная ниже классификация неполна, но дает общее представление о кинематике роботов (см. также [2], с. 30).

Робот с декартовой системой координат (рис. 25.13) двигается по прямым линиям, вверх-вниз и вперед-назад. Для упрощения в таких роботах не предусмотрено одновременное управление перемещениями по обеим осям. Это означает, что перемещение по одной из осей выполняется до полной остановки, и только после этого начинается перемещение по другой оси.

Второй тип — робот, смонтированный на колонне, — имеет рабочее пространство цилиндрической формы (рис. 25.14).

Третий тип — робот со сферической системой координат, называемой также мировой, или полярной, системой координат

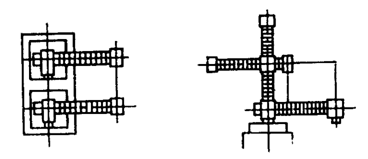


Рис. 25.13. Робот с декартовой системой координат

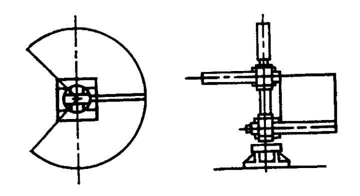


Рис. 25.14. Робот с цилиндрической системой координат

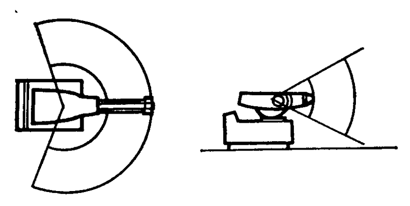


Рис. 25.15. Робот со сферической системой координат

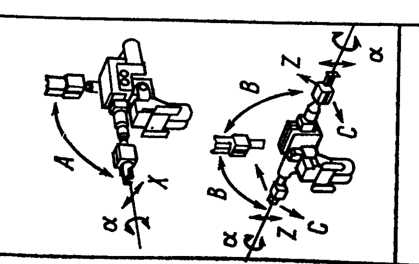
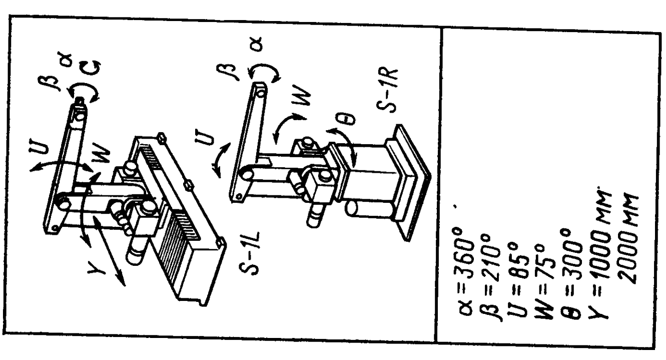
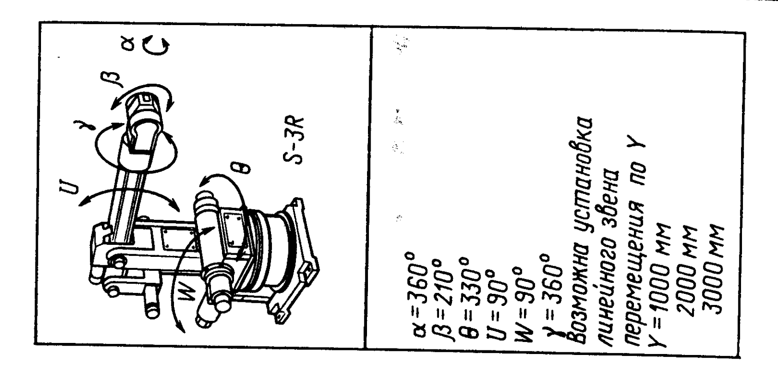
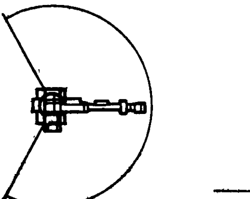
	Максимальная грузоподъемность, приведенная к запястью	20 кг		
α = 90°/100°, A = 90°, B = 180°, C = 120°, X = 150 мм, Z = 150 мм	Без α, β: 10 кг 7 кг; С α: 5 кг 3 кг; С α, β: 7 кг 1 кг	Без α, β: 30 кг 20 кг; С α: 15 кг 9 кг; С α, β: 7 кг 5 кг	α = 360°, β = 210°, U = 85°, W = 75°, θ = 300°, Y = 1000 мм 2000 мм	α = 360°, β = 210°, θ = 330°, U = 90°, W = 90°, γ = 360°; Возможна установка линейного звена перемещения по Y; Y = 1000 мм 2000 мм 3000 мм

Рис. 25.17. Пример документации, предоставляемой поставщиком робота



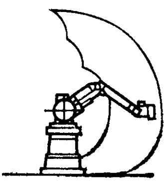


Рис. 25.16. Робот с ангулярной схемой манипулятора

(рис. 25.15). Она характерна для некоторых роботов модели «Юнимейт».

Четвертый тип — робот с ангулярной схемой построения манипулятора (рис. 15.16). Такие роботы выпускаются фирмами «Цинциннати Милакрон», *ASEA* и «Дженерал моторс». Роботы с ангулярной схемой построения манипулятора обладают многими свойствами трех вышеперечисленных типов роботов, так как ЭВМ системы управления позволяет задавать перемещения рабочего органа в различных системах координат. Существенное свойство роботов этого типа — возможность работы в системе координат, связанной с рабочим органом. В этом случае фиксируется направление последнего звена манипулятора и присоединительный фланец перемещается вдоль задаваемой им оси.

Знание особенностей каждого типа роботов облегчает создание управляющих программ. Для некоторых роботов возможно программное переключение систем координат, что позволяет разработчику пользоваться преимуществами той или иной системы. Однако запрограммировать движение сложных роботов, имеющих раздельные приводы по каждой оси, вручную практически невозможно. Для этого необходима ЭВМ. Поскольку роботы имеют разные кинематические схемы, на этапе предварительного проектирования системы следует решить, какой тип робота наиболее удобен для конкретных условий.

25.3.3. Характеристики, предоставляемые изготовителем робота

Изготовитель в технической документации предоставляет множество характеристик робота (рис. 25.17), в число которых входят диапазоны движения и перемещения, точность повторного позиционирования, максимальные рабочие нагрузки, максимальные нагрузки по осям и предельные скорости перемещения, а также предполагаемая область применения.

25.3.4. Разработка схемы размещения оборудования

На этом этапе работы уточняется черновая схема размещения (рис. 25.18). Уточненная схема размещения должна содержать такие важные сведения, как требования к роботам, общее число роботизированных ячеек, последовательность выполнения операций, длительности циклов, время транспортировки от одной позиции до другой, требования к занимаемой площади, размеры буферного пространства и резерв времени на каждой операции.

Во время проектирования системы очень важно, чтобы разработчик технологического процесса точно определил временные интервалы, в пределах которых можно планировать любую из входящих в процесс операций. Это планирование может выполняться

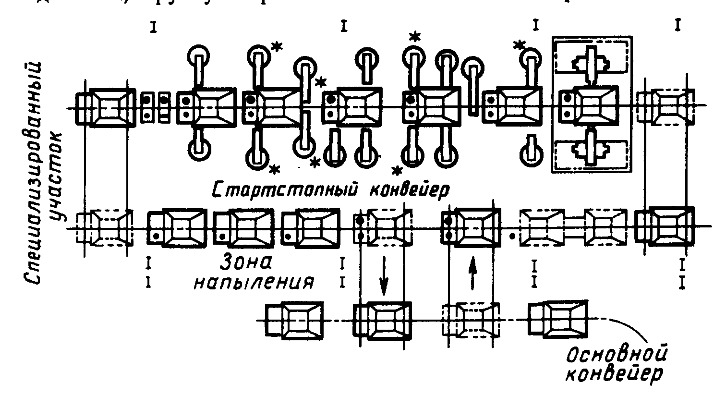


Рис. 25.18. Схема размещения оборудования системы. Конвейер перемещается 62 раза в час, на каждое перемещение уходит 8 с, на обработку в пределах станции приходится 45,06 с (с учетом запаса 5 с)

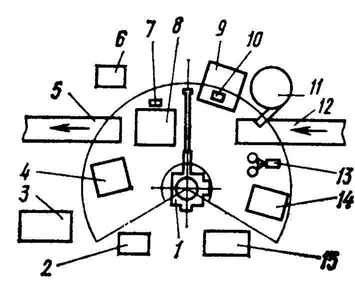


Рис. 25.19. Разработка схемы размещения оборудования роботизированной ячейки:

1 — робот; *2* — источник питания; *3* — место для хранения запасных деталей; *4* — пункт подготовки сборочных узлов; *5* — выходной транспортер для готовых изделий; *6* — контрольно-измерительное оборудование; *7* — датчик; *8* — место выполнения сборки; *9* — пункт механообработки; *10* — балансировочное приспособление; *11* — вибробункер; *12* — входной транспортер; *13* — пункт проверки рабочего органа; *14* — дополнительный пункт механообработки; *15* — устройство управления

несколькими специалистами. Общее управление остается за разработчиком технологического процесса, и именно он должен позаботиться о том, чтобы каждый имел всю необходимую информацию.

По результатам работы для завода делаются черновые схемы размещения роботизированных ячеек, входящих в систему (рис. 25.19). На схемах указываются рабочие пространства роботов, предлагаемые способы подачи деталей и расположение вспомогательного оборудования. Это позволяет определить, достаточно ли места отведено для размещения оборудования. Также следует рассмотреть простои робота. Должно быть предусмотрено пространство для обслуживания оборудования без остановки производственного процесса.

Рекомендуется избегать перекрывания рабочих пространств роботов (рис. 25.20), даже если возможно программное или аппаратное согласование их действий. Как правило, ограничение рабочего пространства неэффективно, и если роботы теоретически могут повредить друг друга, то, скорее всего, они это сделают, несмотря на программные ограничения. Например, возможна ситуация, когда человек управляет роботом вручную и тот случайно пересекает рабочее пространство другого робота, работающего в автоматическом режиме. Устройство управления последнего может не взаимодействовать с устройством управления первого робота, переключенным в автономный режим, и такая ситуация может привести к столкновению. Предвидеть все ситуации при перекрывании рабочих пространств сложно, а часто и невозможно. Поэтому всегда желательно изолировать робот. В идеальном случае роботы должны быть расположены так, чтобы их рабочие пространства не пересекались.

25.3.5. Схема размещения оборудования

Проектируемая система может иметь разные конфигурации. Например, на рис. 25.21 приведена возможная конфигурация роботизированной ячейки для установки стекол. Одновременно используются неавтономная и автономная схемы подачи. Робот сначала берет стекло с подставки (операция называется разгрузкой палеты [2]), затем выполняет линейное перемещение и помещает стекло в зажим, где на него наносится клей. Отпустив стекло, захват робота разворачивается и устанавливает стекло, обработанное на предыдущем шаге.

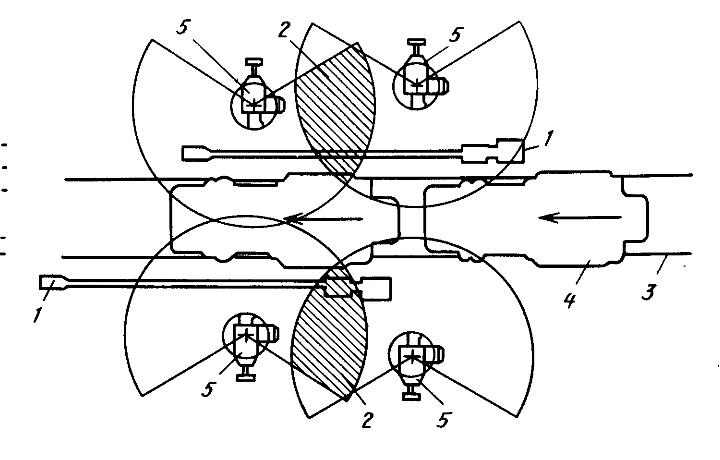


Рис. 25.20. Перекрывание рабочих пространств роботов, работающих в неавтономных ячейках:

1 — синхронизатор; *2* — зоны перекрытия; *3* — транспортер; *4* — транспортная тележка; *5* — робот

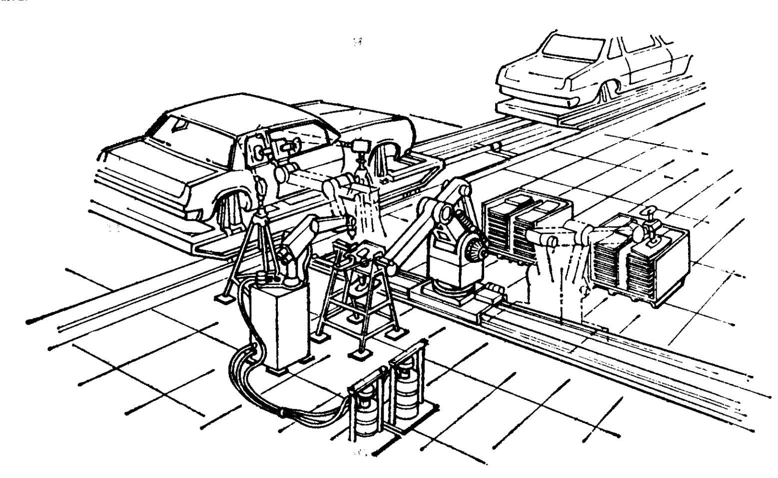


Рис. 25.21. Автономная ячейка подачи стекол для заднего бокового окна, обслуживающая неавтономную ячейку

25.3.6. Планирование работы системы (сравнение стартстопного и непрерывного режимов движения конвейера)

На рис. 25.18 приведен пример типичного стартстопного прямоугольного замкнутого конвейера, обслуживающего обычную поточную линию. Правомерен вопрос, чем стартстопный режим движения лучше непрерывного [7]. Действительно, робот может сопровождать движущийся объект и выполнять действия, которым он обучен в неподвижном положении. Однако создание подобных программ для роботов требует значительных затрат времени. Гораздо проще поместить обрабатываемую деталь непосредственно перед роботом и соответственно спроектировать ячейку. Выгоднее один раз сменить транспортную систему, чем каждый раз заново прорабатывать технологию.

25.3.7. Положение робота относительно обрабатываемого объекта (сеточный способ размещения роботов)

При проектировании сложной системы, содержащей большое количество роботов и другого оборудования, рекомендуется помещать их в узлы воображаемой сетки (рис. 25.22). Такое размещение значительно упрощает распределение операций, работу роботов и(или) периферийного оборудования.

Например, может выясниться, что на месте некоторой ячейки в схеме размещения роботизированной системы расположена несущая колонна, а проектировщик уже на три четверти завершил разработку. При описанном способе размещения изменить расположение робота на бумаге в пределах сетки не составит труда. Эта информация легко может быть передана по телефону в конструкторское бюро, на завод и изготовителям робота.

Еще больше проблем возникает при попытке установить на предприятии большую роботизированную систему. Может оказаться, что имеющееся оборудование мешает выполнению этой задачи, или один

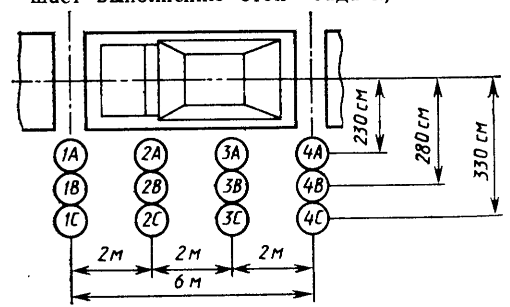


Рис. 25.22. Рекомендуемый фирмой «Фишер» способ стандартного размещения роботов в узлах сетки:

1A — поперечина; *1B* — моторное отделение; *1C* — боковая часть моторного отделения; *2A* — передние водосборники; *2B* — панели дворников; *2C* — стойки для навешивания дверей; *3A* — стык крыла и днища; *3B* — стык крыла и заднего бокового окна; *3C* — козырьки; *4A* — задняя часть кузова; *4B* — проемы в задней части кузова; *4C* — проем заднего окна

робот не может работать в сочетании с другим на одной ячейке. Например, робот-сварщик порогов не может работать с роботом-сварщиком окон, так как кабели сварочных автоматов будут мешать друг другу. В этом случае сварочные автоматы вместе с информацией о выполняемой операции могут быть перемещены на плане в другое место, например, на позицию *2B*. При этом первоначальный замысел сохранится, так как система разрабатывалась с учетом резервных позиций. Обычно отклонение в несколько дюймов при размещении роботов не существенно и конструкция рабочего органа позволяет компенсировать эту разницу. При проектировании системы с большим числом роботов разработчику не следует тратить время на расчет точного положения каждого робота. Естественно, работа системы не должна зависеть от точности установки оборудования.

25.3.8. Влияние точности

При роботизации большинства операций возникает проблема точности. Дело в том, что робот совершает однотипные движения с определенной погрешностью повторного позиционирования, например плюс или минус миллиметр. Это относится и к изделию: здесь отклонение положения любой точки кузова относительно фиксированной эталонной точки на транспортной тележке может достигать 2 мм. Разброс положения транспортной тележки относительно положения робота создает дополнительное отклонение в 0,5 мм. Поэтому в итоге между центральной точкой инструмента на рабочем органе робота и обрабатываемой деталью (рис. 25.23) возможен зазор в 2—3 мм. Чтобы избежать этого, можно использовать маркеры, системы технического зрения, тактильные датчики и другие средства. Добиться высокой точности выполнения операции роботом на поточной или стартстопной линии довольно сложно. Это не зависит от качества обрабатываемого изделия, а связано с погрешностями, возникающими из-за случайных наложений перечисленных отклонений.

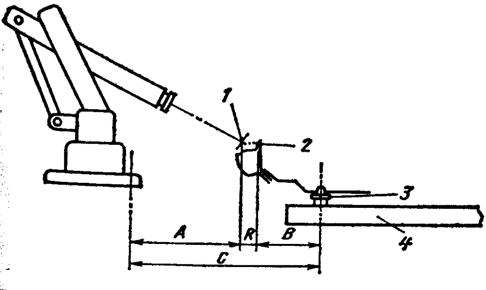


Рис. 25.23. Анализ точностных характеристик роботизированной технологии:

1 — центр инструмента; *2* — рабочая зона на изделии; *3* — опоры транспортной тележки; *4* — транспортная тележка

25.4. Анализ технологических операций

25.4.1. Оценка производительности

Производительность — это количество продукции, которое должно выпускаться за один час. Иначе говоря, это скорость полезной работы. Расчетное значение этой скорости может быть несколько выше, чем реальная производительность на предприятии. Это происходит по следующим причинам: должна предусматриваться возможность работы в «пиковом» режиме для определенных модификаций изделия; может возникнуть необходимость компенсировать снижение выпуска продукции, обусловленное простоями и задержками оборудования. Может потребоваться создание некоторого задела выпускаемых изделий.

Значение производительности определяется технологом и (или) согласовывается с технологами предприятия по их требованию. Последовательно роботизировать ручные операции одну за другой в общем случае крайне дорого и неэффективно. При создании роботизированных комплексов необходимо отталкиваться от возможностей роботов, от того, каким образом можно повысить производительность там, где при ручной обработке добиться этого нельзя.

25.4.2. Расчет затрат времени по операциям

Следующий этап разработки роботизированной системы — это определение ресурса

25.1. Определение затрат времени

Если производительность линии — 75 кузовов в час, то

48 с	общее время обработки в ячейке одного кузова
—8 с	время транспортировки от ячейки к ячейке
40 с	отводится на выполнение операций
—4 с	резерв
36 с	время, отводимое на выполнение операций

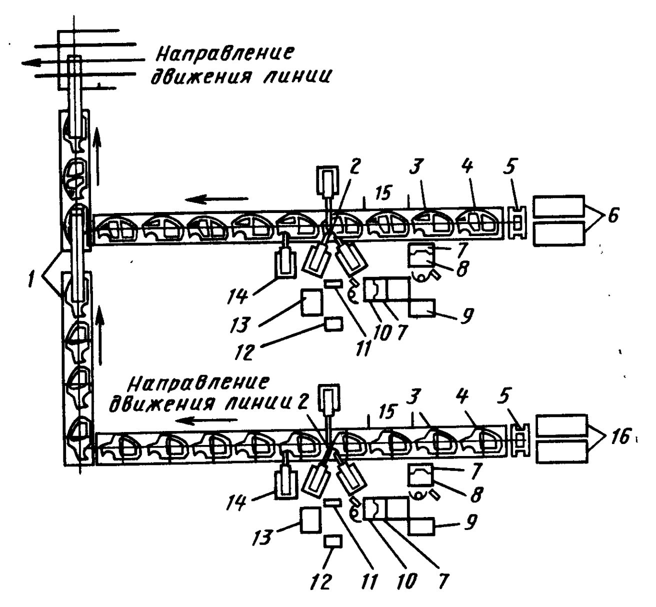


Рис. 25.24. Обеспечение участков накопления:

1 — накопитель; 2 — участок окончательной сварки внутренней и внешней панелей крыльев; 3 — участок установки и предварительной сварки крыльев; 4 — участок сборки внутренних боковин кузова; 5 — тельферный подъемник; 6 — приемные шасси для трех- и пятидверных кузовов; 7 — участок предварительной сварки; 8 — участок установки внешней панели крыла; 9 — штабель внешних панелей крыльев; 10 — участок загрузки внутренних панелей крыльев; 11 — ножницы для разрезки упаковочной ленты; 12 — башенный накопитель; 13 — штабель внутренних панелей крыльев; 14 — участок сварки подкосов сиденья; 15 — резервный участок; 16 — приемник стойки для двухдверных кузовов

времени на каждой операции. При расчете основных затрат времени на роботизированной ячейке технолог должен определить максимальную скорость линии или количество выпускаемых изделий в час (табл. 25.1). Если линия выпускает 75 изделий в час, то на каждую ячейку приходится по 48 с. При стартстопном режиме работы на транспортировку изделия от одной позиции до другой, находящейся на расстоянии 4—8 м, обычно уходит порядка 8 с. В этом случае ресурс времени на каждой позиции составит 40 с. При этом на выполнение операций остается 36 с. 10 % времени (4 с) не учитываются для компенсации возможных случайностей. Очевидно, при дальнейшем анализе технолог сократит это время, но запас в 4 с не очень велик и может быть взят за основу при расчете.

Аналогично должен быть проведен расчет производительности всей роботизированной системы. Обычно на роботизированных ячейках, работающих в автономном режиме, операции выполняются на 10—15 % быстрее, чем на основной линии. Производимая при этом дополнительная продукция поступает в накопитель на случай простоя (рис. 25.24).

25.4.3. Разгон и торможение рабочего органа

Почему вопросы разгона и торможения манипулятора робота представляют такой интерес? Во-первых, у большинства роботов время разгона до максимальной скорости (13—76 см/с) составляет 0,25 с, время до полной остановки — также 0,25 с. По законам физики, при соответствующих затратах энергии объект, имеющий определенную массу (например, манипулятор робота), может набрать скорость лишь за конечный промежуток времени [2]. Отметим то, что даже при интенсивной работе робот никогда не двигается с предельной скоростью, даже если ее значение невелико (13 см/с). Несмотря на то что робот способен перемещать манипулятор со скоростью 152—350 см/с, при выполнении операций более сложных, чем подача деталей, развить такую скорость не удается. К тому же, если на выполнение операции отводится 40—100 с (и более), нет смысла перемещать манипулятор со скоростью 150 см/с.

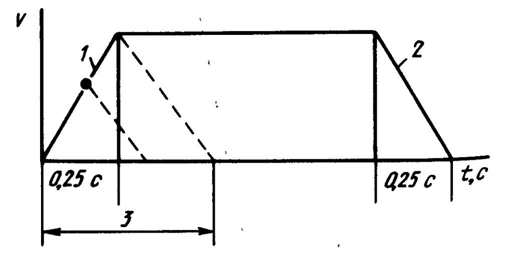


Рис. 25.25. Разгон и торможение и их влияние на быстродействие робота:

1 — участок разгона; 2 — участок торможения; 3 — диапазон, содержащий большинство перемещений

На рис. 25.25 представлен график скорости движения робота. Как было подсчитано, 90—95 % всего времени движения приходится на набор скорости и торможение. Поэтому обычно на перемещение порядка 10 см уходит примерно 0,5 с. Пользуясь этими приближенными значениями, можно оценить затраты времени на перемещения *.

25.4.4. Продолжительность перемещений

Если робот должен переместиться на расстояние порядка 25 см, то можно запрограммировать его передвижение со скоростью 25 см/с. Тогда временем разгона и торможения можно пренебречь: перемещение достаточно велико. При расчете продолжительности перемещения свыше 25 см пройденное расстояние просто делится на заданную скорость. Так, перемещение на 25 см при скорости 25 см/с займет примерно 1 с. На самом деле эта величина будет несколько больше из-за дополнительных затрат времени на разгон и торможение. Однако при программировании можно слегка увеличить задаваемую скорость, например до 30 см/с, и тогда с учетом ускорения и замедления перемещение на 25 см действительно займет 1 с.

Эти упрощения нужны, чтобы избежать сложных математических расчетов при оценке характеристик перемещений. Удобно считать, что для расстояний свыше 25 см значение скорости равно перемещению. Например, если робот должен переместиться на 50 см, следует принять скорость равной 50 см/с, если на 80 см — 80 см/с. Тогда на перемещение будет затрачиваться приблизительно 1 с. Конечно, не обязательно пользоваться именно таким способом, но он удобен: скорость перемещения на большие расстояния рассчитывается легко, при малых же перемещениях вследствие разгона и торможения манипулятор робота никогда не развивает высоких скоростей.

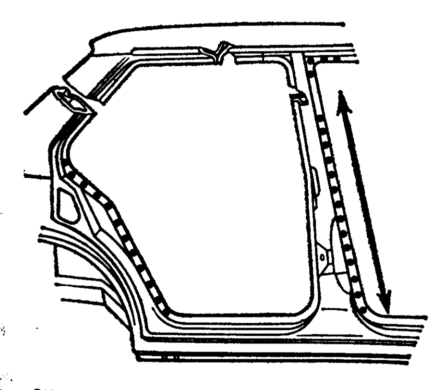
25.4.5. Затраты времени на выполнение технологических операций

Определим затраты времени на выполнение каждого действия рабочего органа робота—сварку, сведение электродов, перемещение. Если сварка производится с перемещением сварочной головки (точечная сварка), то затраты времени будут равны сумме времени, уходящего на подвод головки к нужной точке, и продолжительности сварки. Допустим, расстояние между точками сварки 7,5—10 см и перемещение от одной точки к другой занимает приблизительно 0,5 с; на выполнение сварки в одной точке также затрачивается 0,5 с. Если известно среднее время, необходимое на перемещение и выполнение сварки в одной точке, то можно рассчитать, сколько времени займет сварка в нескольких точках. Для вычисления общих затрат времени на выполнение операции к этой величине нужно прибавить затраты на подвод и отвод рабочего органа.

25.4.6. Прямолинейные и криволинейные перемещения

На рис. 25.26 приведен пример прямолинейного (слева) и криволинейного (справа)

* Необходимо помнить, что приведенные данные неточны и годятся только для предварительной оценки затрат времени. Более точные расчеты проводятся по одной из методик, описанных в гл. 31, кн. 2.



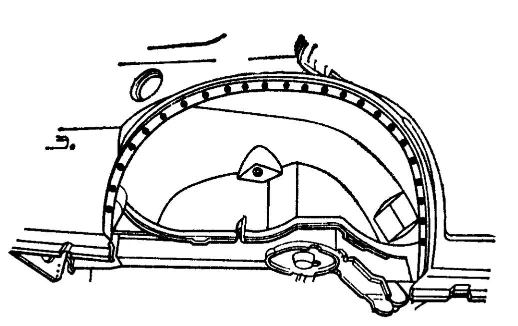


Рис. 25.26. Прямолинейное и криволинейное перемещения

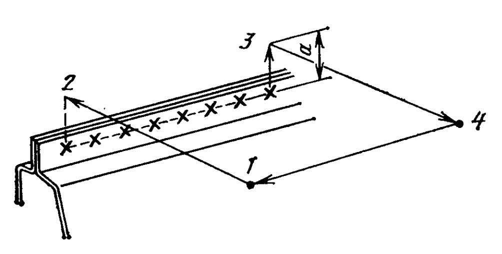


Рис. 25.27. Расчет затрат времени на выполнение операции при прямолинейном движении. Зазор для подвода инструмента к обрабатываемой кромке составляет приблизительно 6 см. Возврат в исходную точку *1* обычно производится во время подачи в ячейку следующего кузова (на особо точные движения следует отвести в два раза больше времени):

1 — начало цикла; *2*, *3* — промежуточные точки; *4* — конец цикла (манипулятор отведен)

перемещений. Сначала рассмотрим перемещения по прямой. Если расстояние между точками 1 и 2 (рис. 25.27) составляет только 13 см, то при движении со скоростью 13 см/с перемещение займет 1 с. Для перемещения на 25 см задается скорость 25 см/с и т. д. Задавать скорость 50 см/с можно только в том случае, когда рабочий орган робота находится не ближе чем 50 см от детали. Такая ситуация может возникнуть тогда, когда манипулятор отводится в сторону на время перемещения изделия.

В начале цикла рабочий орган должен находиться как можно ближе к обрабатываемой поверхности. Подвод робота к детали можно задать следующим образом. Вначале в режиме обучения сварочная головка приводится в соприкосновение с поверхностью. Полученная программа выполняется в обратном порядке (сварочная головка возвращается в исходное положение), и все запомненные точки корректируются на величину зазора. Полученная программа подвода получается достаточно эффективной.

На рис. 25.27 показано, что перемещение из точки 1 в точку 2 может быть выполнено за 1 с, если расстояние между точками менее 50 см. Расстояние менее 10 см современный робот проходит за 0,5 с, а сварка в одной точке, как правило, занимает еще 0,5 с. Таким образом, 1 с затрачивается на подход к рабочей поверхности, 1 с—на опускание головки на обрабатываемую кромку и выполнение сварки в первой точке. На подвод головки к каждой последующей точке и сварку уходит 1 с. Несмотря на то что расчет был приближенным, в нем учтены все факторы, оказывающие существенное влияние на выполнение рабочей операции.

Все непредвиденные задержки компенсируются предусмотренным заранее 10%-ным запасом времени. Такие задержки могут возникнуть из-за обхода неровностей кромки, перехода через вырезы в ней и небольших криволинейных перемещений сварочной головки, плохо поддающихся учету.

25.4.7. Криволинейные перемещения

Теперь рассмотрим затраты времени на выполнение криволинейных перемещений. Будем считать криволинейными все непрямолинейные перемещения. Простейший вид таких перемещений — движение по дуге.

Традиционно скорость перемещений по дуге окружности выражается в градусах на секунду. Но для наших целей удобнее преобразовать ее в скорость линейного перемещения, это позволит связать скорость с пройденным расстоянием.

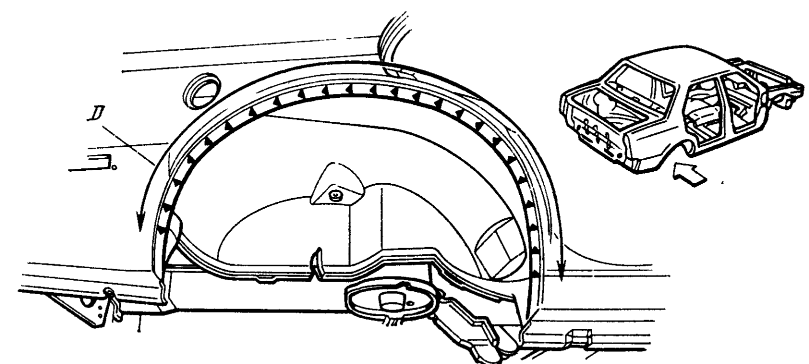


Рис. 25.28. Расчет затрат времени на выполнение операции при криволинейном движении: *D* — измеряемое расстояние

На рис. 25.28 изображено заднее крыло, сварка которого требует перемещения по дуге. При выполнении подобной операции движение вокруг оси вращения манипулятора практически не сопровождается линейным перемещением. Необходимо определить предельное значение скручивающего момента по этой оси, расстояние от центра инструмента до центра вращения и перемещаемую массу. Результаты расчетов сравниваются с допустимой нагрузкой по данной оси робота.

Существует не так уже много величин, характеризующих вращательное движение, и все они не совсем удобны для расчетов. На самом деле достаточно требования, чтобы робот не перемещал рабочий орган по дуге с большей скоростью, чем это допустимо при движении по прямой. Поэтому рекомендуется просто измерить периметр арки колеса (см. рис. 25.28) и оценить затраты времени на его сварку так же, как это делается при прямолинейном перемещении. Возможно, такой метод покажется слишком уж упрощенным, однако он дает более достоверные результаты, нежели более сложные расчеты.

25.4.8. Расчет масс и моментов

Расчет масс и моментов также проводится приближенно. На рис. 25.29 изображена типичная оснастка сварочной головки, массу которой следует сравнить с характеристиками грузоподъемности конкретного робота. Далее с точностью до нескольких сантиметров определяется общий центр тяжести рабочего органа (рис. 25.30). И, наконец, определяется «полезная нагрузка» (рис. 25.31). Обычно это выполняется методом построения равнодействующей. Упрощения позволяют не решать сложные кинематические уравнения, но для того, чтобы полученные результаты были надежными, рекомендуется несколько завышать массу рабочего органа.

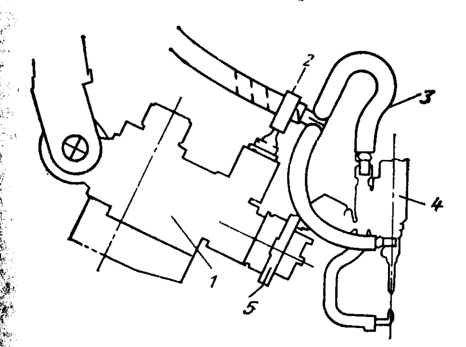


Рис. 25.29. Распределение массы оснастки робота-сварщика:

1 — робот; *2* — подведенный к роботу кабель; *3* — двойной кабель; *4* — самовыравнивающаяся сварочная головка; *5* — предохранительная муфта

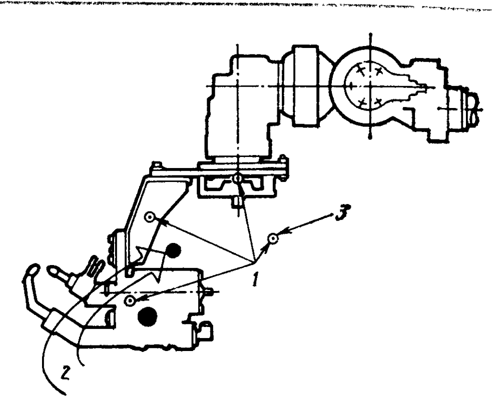


Рис. 25.30. Расчет массы и моментов:

1 — центры тяжести элементов; *2* — центр тяжести всей установки; *3* — центр тяжести кабеля

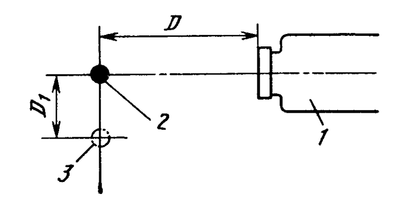


Рис. 25.31. Определение полезной нагрузки $[E = D + D_1 \times$ общий вес, Н·м$]$:

1 — робот; *2* — центр тяжести; *3* — положение смещенной нагрузки

25.4.9. Определение длительности цикла сборочной ячейки

После того как определены основные временные характеристики, можно провести расчет суммарного времени (табл. 25.2). Такой расчет особенно важен в неясных ситуациях. Например, технолог считает, что сварку крыла следует выполнять в одной роботизированной ячейке с помощью одного робота, но оказывается, что отведенного времени не хватает на сварку в последних двух точках. Следовательно, нужно найти какое-то другое решение — не устанавливать же еще один робот для сварки всего в двух точках. Например, можно использовать сдвоенную сварочную головку. Несмотря на то что ее быстродействие несколько ниже, чем у одинарной, она выполняет сварку сразу в двух точках, что

25.2. Расчет длительности цикла сборочной ячейки (фирмы «Фишер»)

Имя программы: РОБОТ	
Входные данные:	
Последовательность сварки	1
Качество металла	3
Толщина металла	0,880990 (мм)
Ход сварочной головки	25,4 (мм)
Продолжительность сварки	0,448 (с)
Ток сварки	9500 (А)
Результаты работы программы:	
Длительность сжатия	0,116
Длительность удержания	0,016
Ход сварочной головки	25,4 (мм)
Длительность задержки сжатия	0,183
Длительность сварки	0,133
Общая длительность сварки	0,448
Ток сварки	9500 (А)
Суммарные затраты времени	35,950
** Номер перемещения=	47
От точки 207,24 22,04	—28,97
До точки 207,24 22,04	—28,97
Линейное перемещение	0,000
Максимальная линейная скорость	0,0
Длительность возврата	0,59
Длительность перемещения и возврата	0,590
Общее время	0,590
Суммарные затраты времени	36,540
**Номер перемещения=	48
От точки 207,24 22,04	—28,97
До точки 207,24 31,49	—28,97
Линейное перемещение	9,450
Максимальная линейная скорость	30,0
Возврата нет	
Длительность перемещения и возврата	0,565
Общее время	0,565
Суммарные затраты времени	37,105
**Номер перемещения=	49
От точки 207,24 22,04	—28,97
До точки 118,11 31,49	39,37
Линейное перемещение	112,314
Максимальная линейная скорость	30,0
Возврата нет	

позволяет на 50 % повысить общую производительность работы.

Далее суммируется время, затрачиваемое на выполнение всех операций. Введя в вычислительную машину уже известные затраты времени по каждой операции, а также другие необходимые данные, такие, как последовательность перемещений, сочетание свариваемых металлов, их толщина, длина хода сварочной головки, зазор между ее электродами, скорость их сведения и т. п., можно получить временные характеристики, необходимые для определения порядка размещения ячеек.

25.4.10. *Учет простоев*

Время простоев также необходимо учитывать. Рекомендуется предусматривать возможность их возникновения на любой из автоматизированных операций. Если в системе много автоматических сборочных ячеек (например, на автомобильном заводе — до 30 ячеек в системе), это становится необходимым. Даже если коэффициент готовности каждого робота 98—99 %, но все они взаимосвязаны, роботизированная система не будет работать как специальная. По крайней мере, все роботы одновременно будут работать редко. По этой причине для каждого робота следует предусмотреть некоторый резерв времени на простой.

25.4.11. *Создание заделов*

Исследования показывают, что длительность 97—98 % простоев не превышает 5 мин, следовательно, для разрешения большинства проблем, связанных с ними, достаточно иметь небольшой задел в 3—4 изделия (см. рис. 25.18). Способ создания межоперационных заделов зависит от типа и размеров системы. В небольших системах, состоящих из 10—15 ячеек, буферные накопители выносятся в конец линии. В более сложных системах небольшие накопители располагаются между крупными роботизированными участками.

25.4.12. *Проверка управляющих программ*

Наряду с определением затрат времени на выполнение операции, массы рабочего органа робота и прочих характеристик необходимо провести проверку управляющих программ. Существует три способа проверки управляющих программ: моделирование с помощью системы машинной графики, построение эскизов в проекциях и пропорциональное моделирование. Сам робот используется для этой цели редко, так как это неудобно и связано со значительными затратами.

25.4.13. *Машинная графика и разработка управляющих программ робота*

Использование машинной графики наиболее эффективно, так как обеспечивает быстроту и гибкость при поиске решений. Системы машинной графики очень перспективны, и, по-видимому, их применение в проектировании роботизированных технологий будет расти. К сожалению, вопросы совместимости и права собственности на используемые алгоритмы препятствуют разработке действительно гибкой инструментальной системы.

При использовании системы машинной графики изображение робота размещается на сетке недалеко от рабочей зоны (рис. 25.32). Это позволяет зафиксировать его положение по всем трем координатам. В сложных случаях, таких, как сваривание крыла, необходимо определить граничные положения манипулятора. На рис. 25.33, который можно получить при помощи системы машинной графики, границы перемещений по каждой оси представлены в форме секторов. Это помогает определять, насколько близко находится предельное положение робота по той или другой оси.

Манипулируя световым пером, можно легко задавать независимые перемещения самого робота, детали или кузова, а также рабочего органа робота. Если в распоряжении разработчика имеются программные средства, позволяющие согласование всех перемещений, то размещение оборудования системы, включающей в себя 30 роботов, можно выполнить за один день (обычно на эту работу уходит несколько недель).

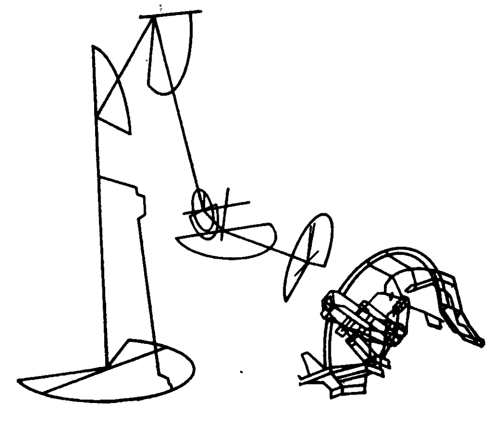


Рис. 25.33. Определение границ перемещений по каждой оси с помощью системы машинной графики

25.5. Рабочий орган робота и вспомогательное оборудование

25.5.1. *Ориентация рабочего органа*

После того как положение робота найдено и диапазоны перемещений по всем осям определены, необходимо задать расположение и ориентацию последнего звена манипулятора — держателя рабочего органа (рис. 25.34) и установить расстояние от присоединительного фланца робота до центра инструмента (рис. 25.35), т. е. до той точки, где будет производиться сварка. По мере возможности эта точка должна располагаться на оси вращения последнего звена манипулятора. Это значительно облегчает программирование. У более совершенных роботов расстояние до центральной точки

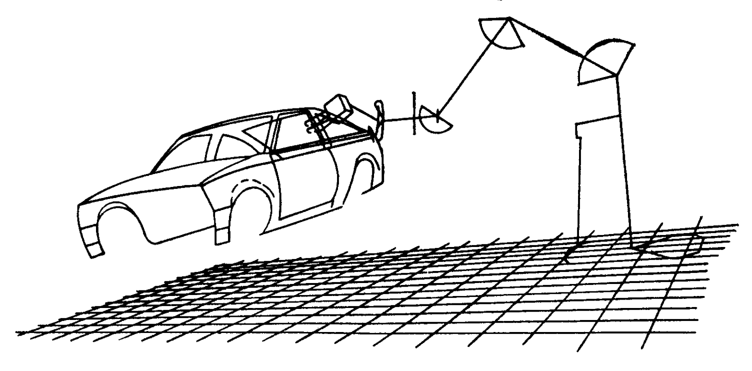


Рис. 25.32. Использование систем машинной графики при разработке роботизированной технологии (определение перемещений робота в пространстве)

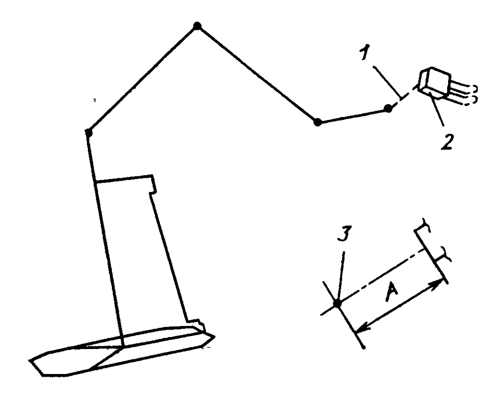


Рис. 25.34. Разработка конструкции держателя рабочего органа (определение положения и ориентации рабочего органа относительно присоединительного фланца робота):
1 — место расположения держателя; *2* — рабочий орган; *3* — ось последнего звена манипулятора

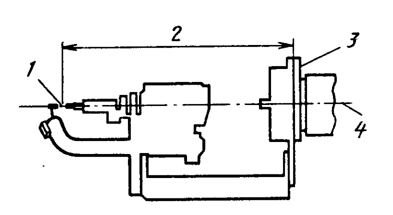


Рис. 25.35. Положение центра инструмента:
1 — центр инструмента; *2* — расстояние до центра инструмента; *3* — присоединительный фланец; *4* — ось крена запястья

можно ввести в управляющую ЭВМ и программным путем скорректировать ориентацию. В некоторых случаях (например, при сварке задней кромки крыши) определить положение держателя рабочего органа бывает довольно сложно. Тем не менее это необходимо.

При проектировании роботизированных систем моделирования с применением системы машинной графики может оказаться недостаточно. Отработка сложных операций требует пропорционального моделирования. Например, в фирме «Фишер» разработчики систем используют выполненные в масштабе модели кузовов и модели роботов, изготовленные поставщиком. В том же масштабе изготавливаются модели сварочных головок, герметизирующих головок и держателей. На полученных моделях проверяют и отлаживают конструкцию держателя рабочего органа.

Особенно этот метод удобен при проектировании операций, связанных с отслеживанием движущейся детали или сопровождением конвейера. Робот, находящийся в неподвижном состоянии, обрабатывает движущееся изделие с момента его подачи в данную роботизированную ячейку и до момента, когда оно уйдет за ее пределы. Точное проектирование и оценка затрат времени такой ячейки невероятно сложны, и моделирование оказывает здесь неоценимую помощь.

Другой метод отработки программы управления роботом — традиционное вычерчивание в проекциях (рис. 25.36), позволяющее разработчику оценить большинство параметров процесса по построенным видам. Для простых операций этого метода вполне достаточно. Когда же разработчик имеет дело со сложными держателями рабочего органа робота, все же приходится использовать пропорциональное моделирование.

25.5.2. Рабочие органы роботов и вспомогательное оборудование

В этом разделе рассматриваются рабочие органы и вспомогательное оборудование,

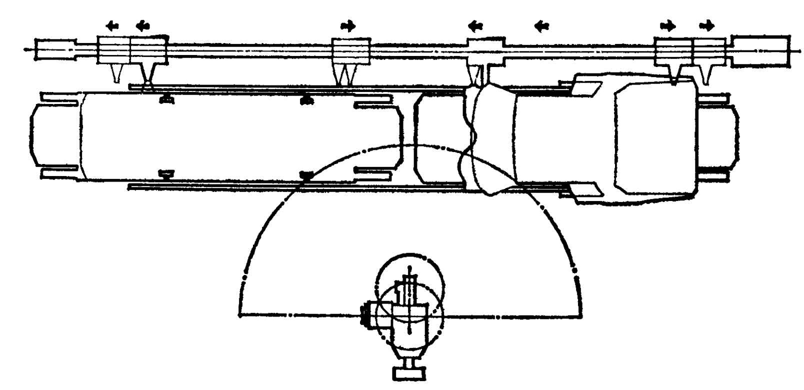


Рис. 25.36. Отработка программы управления роботом (вычерчивание в проекциях)

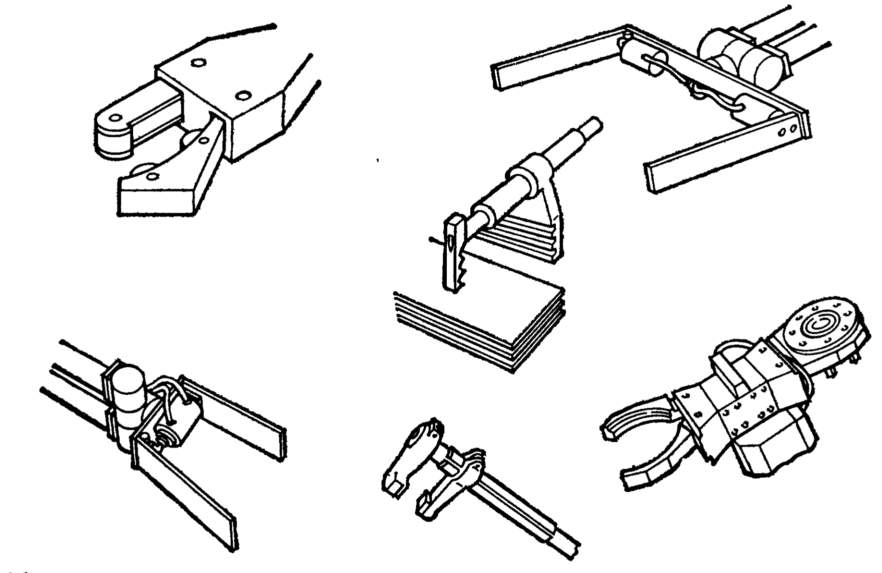


Рис. 25.37. Конструкции рабочих органов

используемое совместно с роботами. Рабочий орган — это устройство, присоединяемое к концу манипулятора робота. Кроме сварочной головки в качестве рабочего органа могут использоваться захваты и другие устройства (рис. 25.37).

Предохранительная муфта. Для установки сварочной головки на конце манипулятора используются предохранительная муфта и несущий кронштейн (рис. 25.38). В результате ошибки перед роботом может оказаться кузов «не той» модели, робот начнет работу и столкнется с кузовом. Между тем роботы по некоторым осям развивают усилие, измеряемое тоннами, хотя нагрузочная способность самых мощных из них не превышает 100 кг. Поэтому робот может нанести по детали или кузову удар силой в 1 т, и, если в подобной ситуации произойдет расцепление муфты, это позволит уберечь от повреждения много готовых кузовов, деталей и (или) рабочий орган робота.

Использование специальных инструментов. Как уже отмечено выше, в цехе изготовления кузовов могут использоваться сдвоенные или даже строенные сварочные головки (рис. 25.39). На предприятии фирмы «Дженерал моторс» в г. Лордстауне скорость работы на конвейере составляет

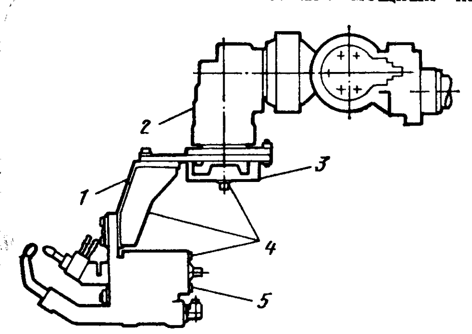


Рис. 25.38. Предохранительная муфта:
1 — кронштейн; *2* — присоединительный фланец; *3* — муфта; *4* — рабочий орган; *5* — сварочная головка

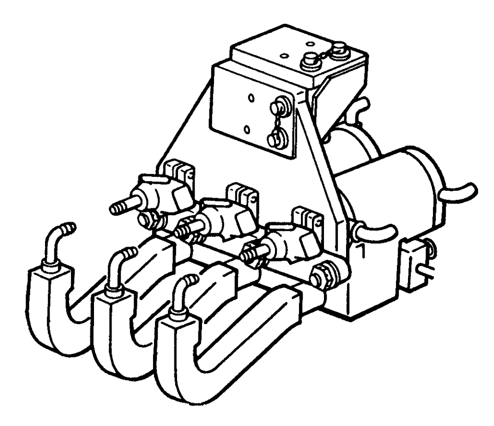


Рис. 25.39. Специальная строенная сварочная головка

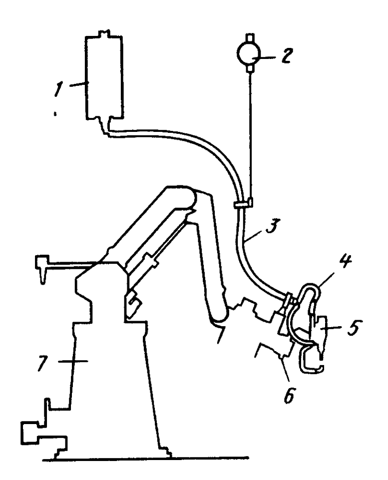


Рис. 25.40. Вспомогательное оборудование сварочной ячейки:

1 — трансформатор; 2 — подвес; 3 — легкоизгибаемый кабель; 4 — переходные кабели; 5 — сварочная головка; 6 — предохранительная муфта; 7 — робот

110 кузовов в час, поэтому на сварку 33 точек порога приходится только 22 с. Можно было либо распределить эту работу между шестью роботами, либо ввести строенную сварочную головку. С ее помощью свариваются только нижние кромки порога, где она перемещается только по прямой и не требуется сложных вращательных движений. Из-за упрощенной схемы движений схема подводки кабелей оказалась тоже простой и сварочная головка работала надежно. Это позволило отказаться от установки дополнительных роботов.

Вспомогательное оборудование. Из-за недостаточной квалификации разработчиков часто недооценивается роль вспомогательного оборудования сборочной ячейки. В частности, в случае сварочной ячейки (рис. 25.40) к такому оборудованию относятся: легкоизгибаемые кабели, противовесы, трансформаторы, соединительные провода, уплотнители и т. п.

Правильная оценка роли вспомогательного оборудования гарантирует полноту заказа оборудования для системы. При установке трансформатора на манипулятор или использовании нетиповых захватов и позиционирующих устройств следует обеспечить надежную работу системы. Для этого необходимо знать вес всех вспомогательных устройств и при проектировании сборочной ячейки не следует пренебрегать этим фактором.

Дополнительное оборудование. На рис. 25.41 изображен пример дополнительного устройства, установленного в рабочем

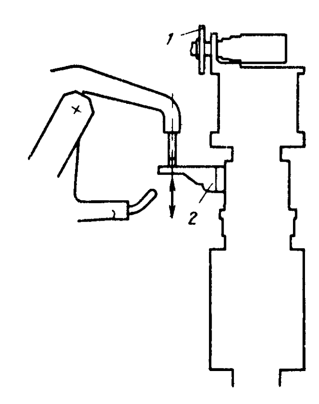


Рис. 25.41. Дополнительное оборудование сварочной ячейки:

1 — щетка для очистки электродов; 2 — приспособление для правки электродов

пространстве ячейки. Это приспособление для очистки и правки электродов сварочных головок. Оно является необходимой частью ячейки и для него также должно быть предусмотрено место.

Следует помнить, что при разработке гибких роботизированных систем необходимо еще раз рассмотреть функции дополнительного оборудования.

25.6. Монтаж роботизированной системы

На стадии монтажа системы желательно иметь чертеж с проставленными размерами (рис. 25.42) и точной разметкой места установки робота. Схемы размещения всех ячеек должны быть достаточно подробными. В случае разработки системы с большим числом роботов руководство предприятия должно приветствовать создание такой схемы технологическим подразделением, поскольку это позволяет увидеть всю систему в целом.

25.6.1. Распределение ответственности за реализацию проекта

По окончании разработки проекта роботизированной системы небходимо определить круг обязанностей сторон, участвующих в его реализации (табл. 25.3). Сюда включаются работы, которые должны быть выполнены изготовителями роботов и специалистами самого предприятия.

После того как завершена предварительная разработка и проект уже находится на стадии рабочего проектирования, его руководитель, по крайней мере, один раз в ме-

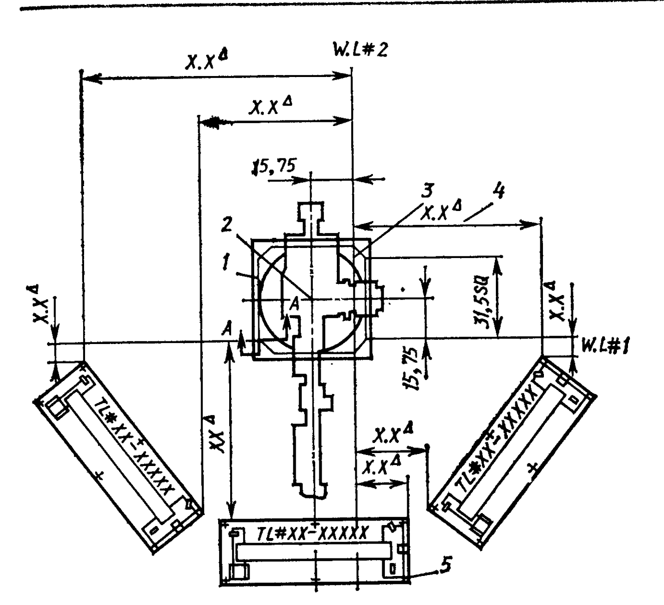


Рис. 25.42. Схема монтажа оборудования:

1 — плита основания; 2 — ось вращения робота; 3 — присоединительные отверстия; 4 — размеры; 5 — установочные винты

25.3. Распределение ответственности за реализацию проекта

Фирма, сдающая систему «под ключ»:
- разрабатывает и устанавливает систему перемещения транспортных тележек;
- разрабатывает и устанавливает устройства подачи кузовов (на тележках и без них) и устройства управления;
- устанавливает роботы и связанное с ними оборудование в соответствии с документацией;
- разрабатывает и выполняет монтаж транспортных тележек;
- разрабатывает программы для всех роботов в соответствии с конкретным технологическим процессом.

Технологический отдел фирмы-заказчика:
- обеспечивает изучение всех тонкостей технологии сварки и ознакомление с технологическими маршрутными картами;
- производит контрольное выполнение операций сварки;
- разрабатывает и изготавливает сварочные головки, кронштейны и предохранительные муфты.

Фирма-поставщик и технологическое подразделение совместно:
- определяют места размещения роботов и высоту кузовов над тележками.

Технологическая служба решает — фирма-поставщик корректирует.

Функции предприятий, где установлена система:
- установить трансформаторы и устройства управления сваркой;
- установить сварочные головки по согласованию с технологической службой.

сяц должен встречаться с представителями всех организаций, имеющих отношение к данной разработке, и обсуждать состояние работ (рис. 25.43).

Важным моментом является составление графика выполнения работ (рис. 25.44). Настоятельно рекомендуется привлекать разработчиков системы к реализации проекта и, главное, к составлению графика работ. При его составлении необходимо многое учесть: когда следует заказать оборудование, когда технологическая служба должна распределить полученные роботы по назначению, когда следует закончить разработку программ обеспечения и т. п. Для контроля за соблюдением сроков, предусмотренных графиком, необходимы частые проверки.

Составлением графика должен, очевидно, заниматься руководитель проекта и ему не следует снимать с себя ответственность за эту работу даже в случае, когда сторонняя фирма обязалась сдать систему «под ключ».

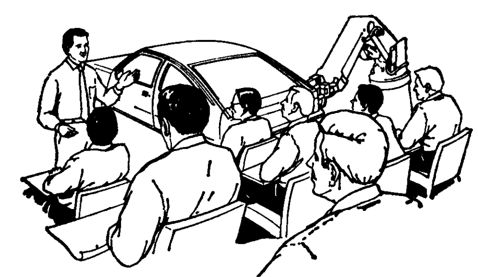


Рис. 25.43. Обсуждение состояния работ

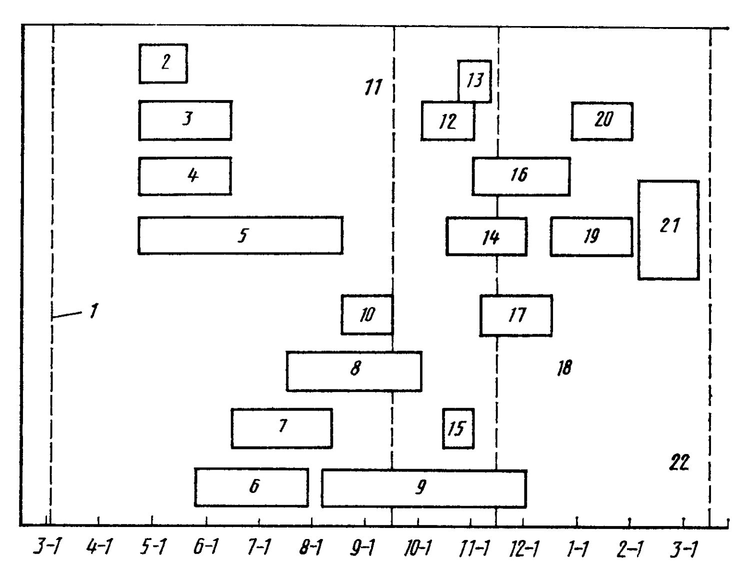


Рис. 25.44. График работ:

1 — завершение производства в Саутгейте; *2* — составление температурных режимов сварочных головок; *3* — составление карты распределения затрат времени по операциям в Саутгейте; *4* — дополнительное изучение процесса сварки в Саутгейте; *5* — составление схемы размещения оборудования проектируемой системы в Саутгейте; *6* — определение порядка размещения резервного и вспомогательного оборудования; *7* — разработка сварочных головок для предприятия в Саутгейте; *8* — начала составления описаний операций; *9* — изготовление сварочных головок и кронштейнов на предприятии в Саутгейте; *10* — изготовление кузова-прототипа; *11* — начало работы вспомогательного завода в Детройте; *12* — доставка транспортера; *13* — доставка роботов; *14* — доставка подъемника; *15* — доставка кузова-прототипа; *16* — установка роботов и транспортеров; *17* — установка подъемника; *18* — окончание работ в Детройте; *19* — составление программ для оборудования в Саутгейте; *20* — опробование оснастки; *21* — опробование усовершенствованных производственных систем фирмы «Милакрон»; *22* — начало выпуска кузовов модели «Джей» в Саутгейте

25.6.2. Составление плана мероприятий

На этапе реализации проекта рекомендуется составлять план мероприятий, который должен содержать наименование мероприятия, фамилии ответственных лиц, дату выполнения и примечания. План позволяет осуществлять оперативное руководство работой по почте, не тратя времени на обмен длинными письмами с поставщиками, различными подразделениями и учреждениями. Такой план дает возможность, не выходя с предприятия, знать состояние дел и в управлении и у поставщика роботов и, возможно, на сборочном конвейере.

Независимо от того, будет использоваться предлагаемый план или нет, за проведением мероприятий следует следить. Это позволит увязать воедино всю информацию, поступающую к руководителю из разных источников.

25.6.3. Подготовка персонала

После установки роботизированную систему необходимо детально изучить и отладить ее работу. Те, кто будут ее эксплуатировать и обслуживать, должны иметь соответствующую квалификацию. Поэтому техническое обучение персонала является непременным требованием!

В решении этого вопроса уже делались серьезные ошибки. Зачастую руководители упускают из виду то, что, пока производство простаивает в течение длительного переходного периода, происходят некоторые потери в составе работающих и снижается квалификация остающихся. К тому же, изменяются не только выпускаемые изделия, но и средства производства, в результате чего имеющихся знаний и навыков может уже не хватить.

Еще не так давно затраты на ввод автоматизированной системы в эксплуатацию серьезно недооценивали. Если в цехе появляются 20 новых роботов, можно не сомневаться в том, что, по крайней мере, в течение полугода в этом цехе должен работать инженер. По истечении этого периода персонал предприятия уже достаточно ознакомится с новым технологическим процессом и оборудованием, чтобы самостоятельно проводить техническое обслуживание.

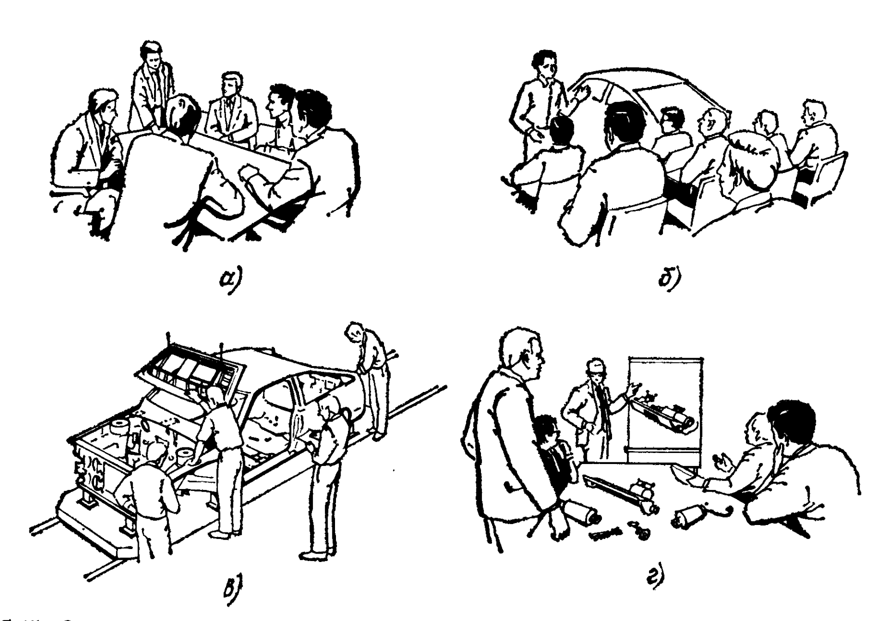


Рис. 25.45. Организация управления качеством:

а — планирование; *б* — совещания по состоянию проекта; *в* — инструктаж; *г* — техническое обучение

Однако на первых порах производству очень нужен специалист, знающий систему до тонкостей, заинтересованный в том, чтобы она работала, и обладающий достаточной квалификацией, чтобы добиться этого.

25.6.4. Наладка и запуск системы

При вводе в эксплуатацию новой роботизированной системы не следует пытаться сразу же, без соответствующего опробирования и наладки начинать выпуск продукции. Опытная эксплуатация небольшой системы займет, может быть, всего несколько недель. Для того, чтобы до промышленного запуска убедиться в работоспособности достаточно сложной системы, может потребоваться порядка трех месяцев. Чего точно не следует делать — это по мере появления первых успехов пытаться ускорить работу путем переналадки роботов.

В среднем на составление управляющей программы робота уходит 4 ч, но это не относится к сложным или определяющим длительность цикла сборки операциям — на них не жалко затратить и 20 ч. Многие нюансы работы системы проявляются только тогда, когда она достигнет некоторого уровня производительности.

В период наладки и ввода системы в эксплуатацию необходимо уделить внимание созданию «кружков качества» или «групп управления качеством» — название не играет роли. Час после работы, посвященный совместному обсуждению возникающих вопросов рабочими и руководителями производства, часто позволяет разрешить многие проблемы (рис. 25.45). Такие встречи значительно упрощают дальнейшую работу.

Благодарности. Хочу выразить свою глубокую признательность Т. Мэрфи, который оказал неоценимую помощь в подборе материала главы. Отдел иллюстраций фирмы «Фишер» достоин всяческих похвал за предоставленную им превосходную графику. Также хотелось бы поблагодарить Дж. Сондерса, сотрудника фирмы «Джи-Эм-Эф-Роботикс», помогавшего редактировать главу, и Ш. Мосс, перепечатавшую ее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Friedrich, O., Economy and Business, *Time*, December 8, 1980.
2. Engelberger, J. F., *Robotics in Practice*, American Management Association, 1980.
3. Tanner, W. R., Ed., *Industrial Robots*, Vol. 1, *Fundamentals*, 2nd ed., Society of Manufacturing Engineers, 1981.
4. DiPietro, F. A., Line Tracking Robots for Body Spot Welding, *Proceedings of the 9th International Symposium on Industrial Robots*, March 1979.

5. Tanner, W. R., Ed., *Industrial Robots*, Vol. 2, *Applications*, 2nd ed., Society of Manufacturing Engineers, 1981.
6. *Proceedings of Robots VI*, Robotics International of SME, 1982.
7. Dawson, B. L., *Moving Line Applications with a Computer Controlled Robot*, in Tanner, W. R., Ed., *Industrial Robots*, Vol. 1, 2nd ed., Society of Manufacturing Engineers, 1981.

Глава 26
ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ: НАДЕЖНОСТЬ, ПРОСТОТА ОБСЛУЖИВАНИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ

Дж. Мансон, фирма «Робот системз», г. Норкросс, шт. Джорджия

26.1. Введение

Для достижения высокой производительности промышленное оборудование должно быть надежным, удобным для технического обслуживания и безопасным в работе. Эти понятия неразрывно связаны между собой.

Безусловно, все оборудование должно служить главной цели — выпуску современной высококачественной продукции в достаточном количестве и по конкурентоспособным ценам. Для любого оборудования — станков, прессов, транспортных устройств, контрольно-измерительных приборов или роботов — выполнение требований высокой надежности, удобства обслуживания и безопасности в работе обязательно. При объединении различного оборудования в систему необходимо учитывать каждый из этих трех факторов для каждого вида оборудования. В противном случае есть риск получить роботизированную систему, не способную решить поставленных задач.

К промышленным роботам перечисленные требования относятся в первую очередь.

26.1.1. Надежность

В подавляющем большинстве случаев роботы являются звеном производственного процесса, предназначенным для обслуживания дорогостоящего основного оборудования. Они во многом определяют коэффициент использования сменного времени этого оборудования. Следовательно, робот должен быть высоконадежен и иметь очень высокий коэффициент готовности, т. е. его конструкция должна обеспечивать возможность легкого и быстрого ремонта. Как показано дальше, коэффициент готовности роботов обычно составляет более 97 %.

26.1.2. Техническое обслуживание

В эпоху автоматизации производства особое значение приобрели вопросы технического обслуживания. Сложность современной техники, управляемой электронно-вычислительной машиной, и удаление с рабочего места человека с его способностью воспринимать обстановку и принимать решения, приводят к необходимости разработки эффективных программ технического обслуживания оборудования. Подход «сломается, тогда и починим» более неприемлем. Возможно, он всегда был неоправданным с точки зрения экономики, но в наши дни это не вызывает сомнений. Оборудование, которое сложно запускать, обслуживать и ремонтировать, является неприемлемым. Готовность, или период работоспособного состояния, зависит не только от собственной надежности оборудования, но и от простоты и скорости ремонта при отказе. Даже в случае, когда среднее время наработки на отказ составляет 2000 ч, конструкция устройства представляется сомнительной, если для обнаружения и устранения неисправности затрачивается неделя, что приводит к невосполнимой потере продукции.

26.1.3. Безопасность

Безопасность работы оборудования оценивается с нескольких точек зрения. Во-первых, должна быть обеспечена защита человека от опасных воздействий во время установки, технического обслуживания и работы оборудования. Во-вторых, оборудование должно быть защищено само от себя, т. е. отклонение от нормального режима работы не должно приводить к повреждению или поломке, и, в-третьих, оборудование должно быть скомпоновано так, чтобы выход из

строя одного из устройств не привел к повреждению других.

Известный писатель Айзек Азимов [1] еще в начале 40-х годов сформулировал «три закона робототехники». Как он утверждает во вступительном слове к книге Дж. Энгельбергера «Применение роботов» [2]: «Я не мог всерьез верить тогда, что своими глазами увижу как работают роботы, как робототехника становится бурно развивающейся отраслью промышленности». Интересно, что эти три закона успешно применяются в ныне процветающей отрасли, и конструкторам и пользователям роботов следует принять их во внимание:

робот никогда не должен наносить вред человеку или своим бездействием допускать нанесение вреда человеку;

робот всегда должен подчиняться приказаниям человека, если они не противоречат первому закону;

робот не должен допускать нанесения вреда самому себе, если это не противоречит первому или второму законам.

И последнее соображение относительно надежности, удобства обслуживания и безопасности в робототехнике. Необходимо позаботиться о том, чтобы конъюнктурные соображения не могли удовлетворяться за счет снижения этих характеристик.

26.1.4. Внешние условия

Надежность оборудования обеспечивается на этапе проектирования, поэтому необходимо тщательно изучить условия, в которых оно будет работать. Это в особенности относится к робототехнике, так как робот должен надежно работать на любых операциях: от резания металлов до обработки мяса. При этом он часто подвергается вредным воздействиям, определяемым экстремальными температурами, влажностью, атмосферными примесями и осадками, тепловым излучением, ударами и вибрацией, электрическими помехами и другими факторами, а также аэрозолями, зачастую агрессивными, абразивными частицами в сочетании со взрывоопасной средой и различными химическими веществами. В табл. 26.1 перечислены некоторые из этих вредных факторов.

Литейные цехи отличаются неблагоприятными условиями работы независимо от их типа. Рассмотрим пример робота, обслуживающего оборудование для литья в постоянные формы. По технологическим условиям он должен располагаться непосредственно на линии разъема пресс-форм, и на него может попадать расплавленный металл (цинк, алюминий, магний). Тигель излучает теплоту. И в большинстве случаев робот

26.1. Вредные факторы производственной среды

1. Окружающая температура: до 50 °С без воздушного охлаждения.
2. Тепловое излучение: источник теплоты до 2000 °F (1100 °С).
3. Удар: амплитуда до 0,5 дюйма (12,7 мм), частота до 2 Гц.
4. Электромагнитные помехи: прерывание управляющих сигналов, переходные процессы при включении двигателей, высокочастотное нагревание.
5. Аэрозоли водные и других охлаждающих жидкостей, часто агрессивных.
6. Дымы и пары: химикаты, используемые в технологическом процессе, очистка паром.
7. Частицы вещества: песок, металлические опилки, горячий шлак.
8. Возможность возгорания или взрыва: открытый огонь, взрывчатые газы и смеси паров.

должен окунать отливку в жидкость для охлаждения. При точном литье по выплавляемым моделям робот находится в атмосфере, насыщенной абразивной силикатной пылью и подвергается воздействию шламов и песчаных смесей. В таких случаях обычно используют наддув чистого воздуха в различные части робота, чтобы избежать проникновения примесей. При необходимости блок электронного управления герметизируется, снабжается кондиционером или размещается вне литейного цеха.

Ковка и термическая обработка металлов связаны с другими вредными воздействиями. В кузнечных цехах — это резкие удары. Робот должен быть не только надежно закреплен, но и установлен на амортизаторах. К тому же нередки случаи, когда во время ковки робот должен удерживать заготовку. Для этого необходим прочный захват. При термической обработке робот, удерживающий раскаленную докрасна заготовку, подвергается сильному тепловому воздействию. Часто используются тепловые экраны, как правило, располагаемые на рабочем органе робота или между роботом и источником теплоты. Иногда применяется периодическое опускание захвата робота в охлажденную воду. Ясно, что в таких случаях установка электрических и электронных устройств или гидравлических приспособлений на кисти или запястье робота нежелательна, а иногда и совершенно недопустима.

При металлообработке опасность создают металлические стружки и охлаждающие эмульсии.

С возникновением новых сфер применения роботов появляются и новые вредные воздействия. Например, роботы стали использоваться в пищевой промышленности (обработка мяса), где они находятся под постоянным воздействием воды и пара. Роботы требуются и для транспортировки мороженых продуктов в огромных холодильниках, где поддерживается температура —23 °С. Разнообразие этих вредных воздействий, осложняющих работу конструктора, кажется беспредельным. Точечная и дуговая сварка, формовка стекла — везде присутствуют различные вредные воздействия внешней среды, которые необходимо учитывать.

Но робот должен не только существовать и работать в агрессивной внешней среде, но и сам быть экологически чистым. Когда говорят о надежности робота в работе, то подразумевают выполнение производственного задания в целом. Поэтому робот не должен создавать загрязнений или каким-либо образом мешать протеканию производственного процесса. Например, сборка многих чувствительных и точных приборов должна производиться в чистом помещении, где попадание даже ничтожных частиц смазочных веществ на оборудование может привести к печальным последствиям. Такие же ограничения действуют в пищевой промышленности, производстве материалов и т. п.

Таким образом, при расчете надежности необходимо проанализировать не только взаимодействие отдельных частей робота, но и их работу при различных внешних условиях.

26.1.5. *Роботизированная система*

Рассматривая вопросы надежности, важно помнить, что робот — это не автономное устройство, а инструмент, входящий в некоторый комплекс и потому тесно связанный с другим оборудованием. Как минимум, это рабочий орган, транспортер, питающее или ориентирующее устройство и обрабатываемая деталь. Кроме них в комплекс могут входить другие роботы или автоматы, станки, прессы, емкости с охлаждающими и технологическими жидкостями, контрольные приборы и управляющее устройство или ЭВМ. Поэтому надежность установленного робота определяется тем, как и насколько хорошо его работа согласована с действием остального оборудования (и в смысле согласованных перемещений и в смысле координации управления). Хотя в намерения автора не входит детальное рассмотрение особенностей и надежности всех перечисленных типов оборудования по отдельности или вместе взятых, важно отметить, что они затрудняют создание надежной, удобной в обслуживании и безопасной роботизированной системы.

Наглядным примером такой системы может служить роботизированный комплекс точечной сварки автомобильных кузовов. Невольно приходишь в волнение, наблюдая как роботы лихорадочно обрабатывают кузов со всех сторон, спеша закончить сварку до того, как конвейер переместит его на следующую позицию.

При внимательном рассмотрении можно увидеть кое-что кроме работающих роботов. Это конвейер, который транспортирует кузова от одной роботизированной ячейки к другой. От точности, с которой позиционируется кузов, зависит положение каждой из порядка 3000 точек сварки. Тип каждого кузова определяется автоматически, и передача информации от ячейки к ячейке организована таким образом, что управляющее устройство может сообщить каждому роботу, какая из его программ требуется в данный момент, по сети управления на каждую ячейку передается состояние транспортера — в движении или на позициях сварки. До того как конвейер переместится на следующую позицию, каждый робот должен сообщить управляющему устройству, что он закончил работу и находится в безопасном положении. Следует регулировать поступление охлаждающей воды в сварочные органы каждого из роботов: электрод не должен замыкаться на металлические части (периодическое техническое обслуживание вручную или автоматически); управляющее устройство сварочной головки должно обеспечивать нужный режим сварки; робот должен сообщить управляющему устройству, когда нужно сжимать электроды и даже с каким усилием. И, конечно же, робот должен направлять электрод точно в нужное место. И это еще не все. Но вывод ясен: высокого качества сварки кузовов не добиться, пока все оборудование не будет работать надежно. Каждая минута простоя оборудования обходится в тысячи долларов.

Часто для обеспечения непрерывности выпуска продукции предпринимаются меры, упреждающие возможные сбои или отказы. В некоторых случаях предусматривается дублирование робота человеком или ручное управление. В приведенном примере роботизированной сварки кузовов на случай отказа какой-нибудь ячейки вдоль линии установлены резервные роботы. При обнаружении неисправности управляющее устройство выдает необходимые команды (в том числе для подачи сигналов тревоги оператору). Хорошо продуманная роботизированная си-

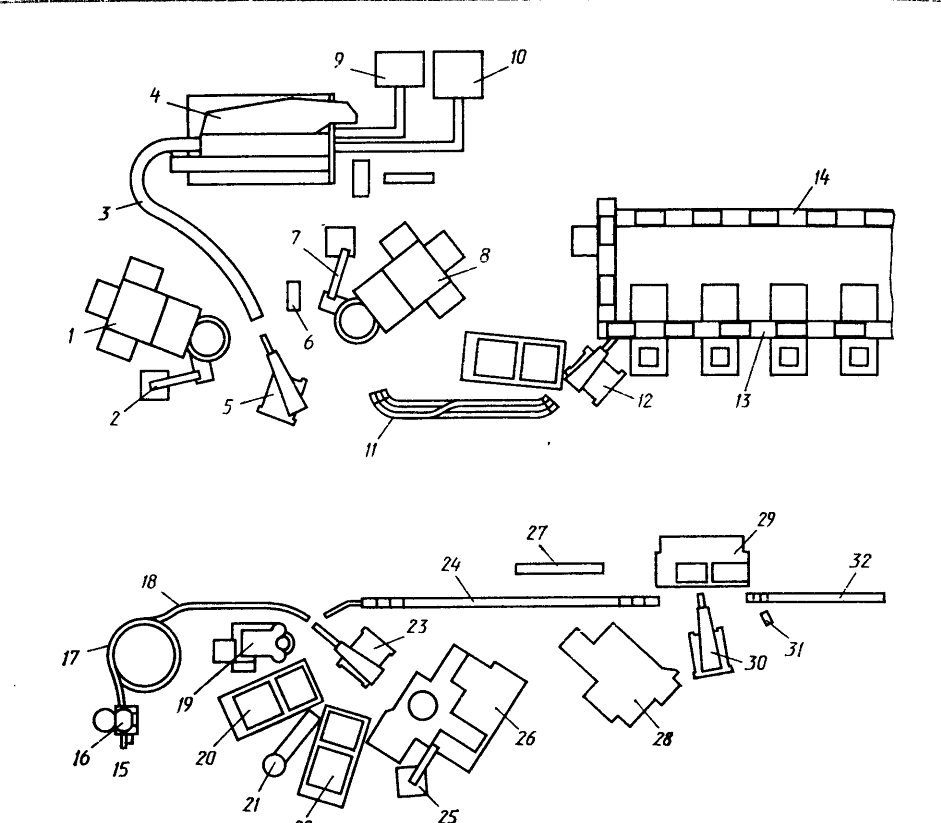


Рис. 26.1. Четыре робота объединяют оборудование в гибкую систему:
1 — фрезерный станок; *2* — питатель; *3* — входной транспортер; *4* — протяжной станок; *5* — робот «Юнимейт-21058»; *6* — станция технического контроля; *7* — питатель; *8* — фрезерный станок; *9* — питатель; *10* — питатель; *11* — транспортер; *12* — робот «Юнимейт-20058»; *13* — конвейерная линия; *14* — линия возврата пустых палет; *15* — подача заготовок; *16* — подъемник; *17* — накопитель; *18* — входной транспортер; *19* — фрезерный станок; *20* — накопитель палет; *21* — станция контроля; *22* — накопитель палет; *23* — робот «Юнимейт-21068»; *24* — транспортер; *25* — накопитель стружки; *26* — сверлильно-фрезерный станок; *27* — устройство управления системой; *28* — сверлильный станок; *29* — моечная станция; *30* — робот «Юнимейт-21058»; *31* — станция зачистки; *32* — выходной транспортер

стема должна иметь в своем составе устройства диагностики и сигнализации, точно определяющие местоположения неисправности, что позволяет быстро принять меры для ремонта.

Иногда для стабилизации пропускной способности системы используют буферные накопители (рис. 26.1). В случае технического обслуживания или ремонта одной из ячеек, детали к следующей поступают из накопителя. По команде, приходящей от управляющего устройства (на заднем плане), выбирается нужная подпрограмма, и робот либо кладет детали в накопитель, либо берет их оттуда.

Эти примеры приведены для того, чтобы подчеркнуть необходимость оценки надежности и работоспособности роботизированной ячейки или совокупности связанных роботизированных ячеек. Далее будет показано, что при оценке необходимо учитывать удобство технического обслуживания и безопасность работы.

26.2. Надежность

Вопросам расчета и определения реального значения надежности посвящено сравнительно мало работ. Однако миллионы часов эксплуатации и наработки некоторыми устройствами до 10 лет сменного времени позволили опытным путем определить значения наработки на отказ и затрат времени на техническое обслуживание. Получены впечатляющие результаты, превосходящие эксплуатационные характеристики большинства видов оборудования. Практи-

чески во всех случаях робот был работоспособен, по крайней мере, 97 % сменного времени. Известны случаи, когда эта цифра достигала 99,5 %.

Это объясняется не только высоким качеством конструирования и производства роботов, но и пониманием того, что робот только так и должен работать. Иначе его жизнеспособность, технологическая гибкость и экономические преимущества становятся бессмысленными.

26.2.1. Основные определения

Выше были использованы несколько тесно связанных между собой понятий: надежность, коэффициент готовности, удобство обслуживания и время безотказной работы. Во избежание различного толкования приведем определения этих понятий.

Надежность устройства обычно определяют как вероятность удовлетворительной работы в течение определенного периода времени в определенных условиях [3]. Существует простая зависимость между надежностью оборудования (R) и средним временем наработки на отказ ($MTBF$). Эта зависимость носит экспоненциальный характер, т. е. значение надежности остается без изменений в том случае, если отказы оборудования следуют через постоянные промежутки времени в течение всего периода эксплуатации:

$$R \text{ (за } t \text{ часов)} = exp\,(-t/MTBF).$$

В соответствии с этим соотношением надежность может быть выражена через допустимое среднее время наработки на отказ. Эта функция представлена на рис. 26.2.

Понятие надежности можно рассматривать гораздо шире. Так, существует такое понятие, как функциональная надежность, которая учитывает не только надежность, определяемую конструкцией и возможностями совершенствования конструкции, технологией производства и методикой проверки работоспособности, но и снижение надежности в результате погрузочно-разгрузочных операций, транспортировки, хранения и установки. Однако в задачи данного исследования не входит анализ таких тонкостей.

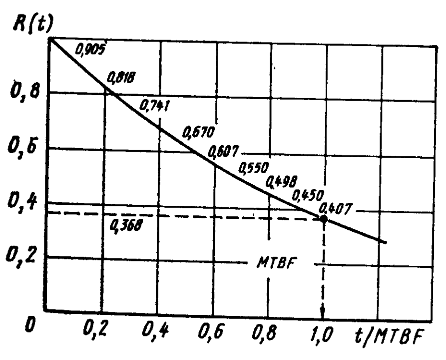


Рис. 26.2. Экспоненциальная зависимость надежности от времени работы (с разрешения Центра военно-морских сил)

Коэффициент готовности — это вероятность того, что в любой момент времени оборудование будет готово выполнить заданные функции [3]. Эта характеристика показывает, сколько раз оборудование было готово, когда это было необходимо. При подробном рассмотрении коэффициента готовности учитывается и работоспособность, заложенная в конструкции (включая удобство технического обслуживания), и снижение готовности, зависящее от полноты ЗИП, квалификации обслуживающего персонала и наличия необходимого оборудования для проверки и ремонта. В дальнейшем будем считать синонимами коэффициент готовности и период работоспособного состояния (в процентах).

По определению, готовность зависит от среднего времени наработки на отказ и средней длительности восстановления работоспособности (ремонта) — $MTTR$. Их взаимосвязь определяется следующим уравнением:

$$A = MTBF/(MTBF + MTTR) = 1/(1 + MTTR/MTBF),$$

где A — коэффициент готовности. Если значение отношения $MTTR/MTTR$ известно, то коэффициент готовности оборудования может быть определен с помощью графика, приведенного на рис. 26.3. Соответственно,

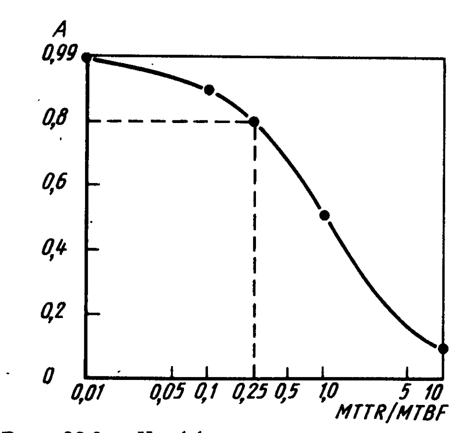


Рис. 26.3. Коэффициент готовности как функция среднего времени наработки на отказ (с разрешения Центра военно-морских сил)

Рис. 26.4. Точки контроля надежности в жизненном цикле оборудования «Юнимейшн» (с разрешения фирмы «Юнимейшн»)

если необходимо, чтобы коэффициент готовности оборудования был равен конкретному значению, и известно $MTTR$, то по графику можно найти требуемое время восстановления. Это очень удобно при определении жизнеспособности оборудования. В условиях производства более приемлемым является оборудование, у которого $MTBF = 500$ ч, а $MTTR = 4$ ч, нежели то, у которого $MTBF = 5000$ ч, а $MTTR = 40$ ч.

Таким образом, среднее время восстановления служит характеристикой удобства обслуживания. Время восстановления будет зависеть от скорости, простоты и точности диагностики и устранения неисправности.

26.2.2. *Планирование надежности*

Известен случай, когда для обеспечения надежности в 98 % или более изготовителями роботов были проведены обширные всесторонние исследования. Были собраны исчерпывающие данные, учитывающие возможное влияние каждого компонента на интенсивность отказов системы в целом. Использовалась методика расчета, разработанная правительственными учреждениями США

26.2. Оценка надежности роботизированной системы «Юнимейт»

Тип отказа	Частота отказов, 10^{-6}	MTBF, ч
Отказы деталей:		
электронных и электрических цепей механических и гидравлических систем	555 673	1800 1485
Отказы, не связанные с неисправностями деталей:		
электронных и электрических цепей механических и гидравлических систем	267	3745
Сбои в технологической среде:		
некондиционные детали	1228	815
превышение допустимых погрешностей	742	1350
Итого	1970	508

Примечание. По результатам оценки при стандартном значении надежности среднее время наработки на отказ системы «Юнимейт 2000» составляет 500 ч.

для определения надежности космических транспортных систем.

Первым шагом при проведении исследования было тщательное изучение вероятной надежности всех электронных и механических деталей, а также «невещественных» составляющих. Возникновение отказов, вызванных невещественными составляющими, связано с ограниченностью в расходах, наложением допусков, неправильной эксплуатацией, условиями окружающей среды и т. п. Результаты исследования представлены в табл. 26.2. Расчетное значение $MTBF$ составило 508 ч.

Это означает, что среднее время восстановления не должно превышать 10,2 ч. Для того, чтобы довести характеристики отдельных компонентов системы до стандартных и путем статистического анализа убедиться, что запущенная в космос система долетит до назначенной цели, изготовителями системы был разработан комплекс организационных мер. На рис. 26.4 показаны точки контроля надежности в жизненном цикле оборудования и результаты испытаний.

Окончательное значение $MTBF$ составило 415 ч, а среднее $MTTR$ оказалось порядка 4,8 ч, что дает значение коэффициента готовности 98,8 %.

26.2.3. *Ожидаемые перспективы*

Можно предположить, что дальнейшее усложнение робототехнических систем приведет к снижению надежности последующих поколений роботов. Однако накопление опыта в производстве роботов и постоянно растущая надежность входящих в них электронных устройств позволяют все же надеяться на увеличение надежности роботов.

26.3. Техническое обслуживание

Пожалуй, ни к одной другой статье производственных расходов не относились с таким пренебрежением и непониманием, как к техническому обслуживанию. Было подсчитано, что из 200 млрд. долл., ежегодно расходуемых на американскую промышленность, по крайней мере, 60 млрд. составляют убытки [4]. Более того, плохое обслуживание оборудования оборачивается низким качеством продукции, нарушением производственного ритма, задержкой поставок и потерей покупателей. Практически во всех случаях эти потери явились результатом подхода: «починим, когда сломается».

Как уже было отмечено выше, надежность функционирования зависит от собственной надежности оборудования и скорости ее снижения, определяемой, кроме

всего прочего, эксплуатацией. Снижение функциональных возможностей можно замедлить только правильной эксплуатацией и профилактическим техническим обслуживанием. Продуманная, хорошо спланированная и правильно проводимая программа технического обслуживания выгодна с нескольких точек зрения. Уже сам факт, что программа существует и правильно проводится, повышает технологическую дисциплину, которая существенно влияет на сумму расходов. Например, при выполнении большинства операций технического обслуживания не ведется никакого учета запасных деталей. Сообщалось, что на одном крупном предприятии, закупившем запасных деталей на сумму 70 млн. долл., отчетные документы были представлены только на 35 млн. долл. [4]. Остальные детали, по-видимому, просто где-то затерялись.

Профилактическое обслуживание — всеобъемлющее понятие.

Сложность системы. Тенденция к увеличению сложности автоматики и автоматизированного управления процессами делает необходимым профилактическое обслуживание. Нельзя более надеяться на то, что оператор вмешается в работу и исправит что-либо. Автоматизированные системы не прощают ошибок.

Повышение надежности. Устраняется или предупреждается снижение работоспособности и износ оборудования. Предотвращается пренебрежительное обращение с оборудованием.

Усиление производственной дисциплины. Выполнение намеченной программы технического обслуживания требует координации деятельности отдела технического обслуживания, производственной и инженерной служб. Запасные детали, диагностическое оборудование и документация должны быть учтены и готовы к использованию. Необходимо заботиться о подготовке кадров. Акцент должен делаться на поддержание работоспособности оборудования, а не на его ремонт.

Уровень квалификации. Обслуживающий персонал должен быть обучен соответствующим образом. Возлагаемые на каждого работающего функции должны отвечать его квалификации (например, не стоит возлагать на электрика обслуживание фрезерных станков). Продуманная программа переподготовки гарантирует поддержание квалификации персонала на должном уровне.

Окупаемость капиталовложений. Большие затраты на приобретение основных средств производства окупаются лишь при непрерывной высокопроизводительной работе. Недостаточное техническое обслуживание может привести к снижению доходов.

Квалификация работающих. Эффективность работы любого подразделения зависит от квалификации его сотрудников. Проведение эффективных программ технического обслуживания окажет существенное влияние на качество работы и атмосферу на рабочих местах. Настроение работающих может оказаться действенной силой в достижении высокого качества и производительности труда.

Производительность. Непредвиденные простои снижают выпуск готовой продукции и ведут к срыву сроков поставки. Лучший и единственный способ избежать этого — планомерно проводить программу профилактического обслуживания.

Проведение технического обслуживания обходится дорого. Отсутствие технического обслуживания может обойтись еще дороже. Было подсчитано, что при эффективной программе затраты на техническое обслуживание могут составить до 10 % стоимости реализуемой продукции [4]. Поэтому желательно, чтобы руководителем был человек, сведущий в экономике и имеющий квалифицированных консультантов по вопросам техники. Потому что в сущности, техническое обслуживание — это экономический вопрос.

26.3.1. *Техническое обслуживание роботов*

Надежность работы и долговечность роботов зависят от технического обслуживания, каким бы несложным оно ни было. Робот на производстве можно считать состоящим из трех составных частей.

Первая из них — манипулятор, функциональный элемент, физически выполняющий все операции. Он представляет собой многозвенный механизм с гидро-, пневмо- или электромеханическим приводом. Более полное описание различных конструкций роботов содержится в гл. 5. Основные элементы конструкции рабочего органа и трансмиссий робота — рычаги и зубчатые передачи, приводные ремни или цепи, скользящие или вращающиеся опоры, сальники различных типов и т. д.

Хотя большинство деталей и сборочных узлов хорошо известны обслуживающему персоналу, их конструкция и использование могут иметь специфические особенности. Например, конструкция зубчатых передач должна обеспечивать минимальный мертвый ход, поскольку точность повторного позиционирования запястья зависит от мертвого хода и трения во всех звеньях механизма. Гидравлические и пневматические приводы по тем же причинам должны иметь малые значения трения покоя и скольжения. Вдобавок, утечка в них должна быть по

возможности минимальной. Утечка отрицательно сказывается на динамике механизма и его способности, не отклоняясь, удерживать заданную позицию. Поэтому важную роль играют конструкция и материал уплотнений, а также точное соблюдение последовательности сборки привода.

В большинстве случаев профилактическое техническое обслуживание этих узлов манипулятора включает периодический визуальный и (или) приборный контроль, при котором определяется, не требуется ли регулировка и нет ли признаков чрезмерного износа. Большая часть поставщиков роботов разрабатывает таблицу контрольных проверок и инструкции по устранению неисправностей, базирующиеся на опыте эксплуатации. Даются рекомендации по срокам замены деталей. В табл. 26.3 приведена одна из восьми страниц графика профилактического обслуживания, проводить которое следует через каждые 1000 ч работы. В табл. 26.4 представлен график замены деталей на срок до 2000 ч работы.

В роботах с позиционно управляемыми гидравлическими звеньями применяются весьма сложные сервоклапаны. Их надежность высока, а время наработки на отказ исчисляется тысячами часов, но они очень чувствительны к содержанию примесей в рабочей жидкости. Если рабочая жидкость поставляется изготовителем, то ее заливку в гидросистему следует производить непосредственно из тары поставщика. Если потребитель сам изготавливает рабочую жидкость, она должна соответствовать спецификации поставщика робота, а для этого может оказаться необходимым предварительно ее отфильтровать. При закупке рабочей жидкости фильтрование становится обязательным, так как при перевозке она почти наверняка засоряется. Особенно это вероятно при оптовой закупке.

Как правило, в состав гидросистемы робота входят основной фильтр, фильтр обратной магистрали и индивидуальные фильтры сервоклапанов. Пройти все фильтры могут частицы размером не более 35 мкм. Один из изготовителей роботов предлагает проводить профилактический анализ проб жидкости на содержание примесей. Для этого даже предусмотрены специальный кран и чистые бутылочки для проб. Очевидно, что при вскрытии гидравлических линий следует соблюдать предельную осторожность во избежание проникновения примесей в гидросистему.

К пневматическим приводам роботов предъявляются аналогичные требования по чистоте рабочего тела. В дополнение к ним необходимо принимать меры для его осушения. Как правило, заводские компрессорные станции дают сжатый воздух с большой концентрацией конденсата (воды). Осушители должны самоочищаться, но тем не менее их необходимо регулярно проверять. Располагать их следует непосредственно на входе пневмосистемы. Кроме того, требуется техническое обслуживание дополнительных внутренних фильтров.

26.3. Фрагмент журнала профилактического технического обслуживания роботов «Юнимейт»

Выполняемые работы	Отметка о проверке	Принятые меры
Питание и схемы блокировки		
6. Проверка отработки сигнала «СТОП» с пульта-приставки путем размыкания нормально замкнутого переключателя *A9*		
7. Проверка отработки сигнала «ОСТАНОВ» с пульта-приставки путем размыкания нормально замкнутого переключателя *A8*		
8. Проверка срабатывания переключателей блокировки дверей рабочей зоны		
9. Проверка реле питания сервосистемы путем изъятия реле *4CR*, робот находится в состоянии «ОСТАНОВ»		
Электронные устройства при включенном питании		
1. Индикаторные лампы платы 918*B*		
а. Проверка исправности ламп путем изъятия их из патронов		
б. Индикаторная лампа «Сбой по четности» не должна загораться в режиме воспроизведения программы при нажатой клавише «Начало цикла»		
в. Индикаторная лампа «Питание» должна быть включена постоянно и т. д.		

Манипулятор робота необходимо регулярно (хотя и не слишком часто) смазывать в нескольких точках. В некоторых случаях смазочный материал наносится непосредственно на опорные поверхности, но как правило, предусматриваются специальные емкости для смазочного материала — масленки и патрубки.

Большинство роботов имеют воздушную систему охлаждения с воздушными фильтрами на входном отверстии. Во избежание перегрева механизма и повреждения его частей необходимо часто проводить профилактическое обслуживание. Хотя изготовитель робота сообщает рекомендуемые интервалы между осмотрами, частота их проведения может изменяться в ту или другую сторону в зависимости от состояния окружающей среды. Если воздух сильно запылен или загрязнен маслами, то фильтры забиваются быстрее. Следует заботиться о том, чтобы температура воздуха на входе системы охлаждения не превышала указанную изготовителем, и при необходимости вдувать охлажденный (не обязательно кондиционированный) воздух.

26.4. Фрагмент графика замены деталей робота «Юнимейт», имеющих продолжительный срок службы

Заменяемая деталь		Заменяется по мере наработки, ч, 10^3																			
Номер	Наименование	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
403ВД1	Комплект для профилактической замены	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
377Н3В	Лампа шифратора										+										+
922Н1	Зубчатые передачи манипулятора										+										+
922В1	Электродвигатель привода запястья										+										+
922В2	Электродвигатель привода запястья										+										+
127А1	Сервоклапан										+										+
313ВН	Спускной клапан										+										+
825Н1	Аккумулятор										+										+
1912АГ5	Кабель шифратора										+										+
182АУ1	Кнопочный выключатель и т. д.															+					

Второй элемент робота — система управления, которая может находиться в одном корпусе с манипулятором, или оформляться в виде отдельного пульта, соединенного с манипулятором. Управление может быть электрическим, электронным или пневматическим. Блок управления снабжается либо воздушным охлаждением, либо кондиционером, но и в том, и в другом случае необходимо профилактическое обслуживание воздушных фильтров. При пневматическом управлении постоянного внимания требуют фильтры сжатого воздуха.

В общем случае при обслуживании управления нужно провести функциональный контроль, регулировку электрической или электронной цепи, убедиться в целостности монтажа компонентов, определить возможный износ проводов и кабелей и состояние разъемов и соединительных проводов.

В общем случае техническое обслуживание устройств управления включает в себя функциональный контроль и регулировку электрической или электронной схемы, проверку надежности крепления всех элементов, целости проводов и кабелей, а также состояния всех соединений и разъемов.

При функциональном контроле в определенном порядке проверяются все органы ручного управления и переключатели, наличие силового питания и т. п. Во время работы большинство органов ручного управления не используются, поэтому важно их периодически проверять. Для обеспечения максимальной производительности необходимо поддерживать соответствующее напряжение и своевременно проводить настройку устройства управления.

Наиболее важна регулировка системы сервоуправления — от нее зависят ускорения и скорости перемещения манипулятора. Неправильная регулировка ведет к

увеличению длительности цикла и к износу и (или) повреждению оборудования. Для роботов с гидроприводами большое значение имеет настройка сервоклапанов. Неправильная «установка нуля» сервоклапана не позволяет задать параметры сервоуправления с достаточной точностью, а это ведет к погрешностям перемещения манипулятора.

Очевидно, что в зависимости от особенностей конструкции и сложности робота номенклатура технического обслуживания управляющих и запоминающих устройств широко варьируется. Необходимо еще раз подчеркнуть, что эти мероприятия должны носить профилактический характер — они определяют работоспособность всех частей робота. По степени обеспечения пользователя документацией, методическим материалом и графиками профилактического обслуживания можно судить о производительности и надежности робота.

Третий элемент робота — оснастка рабочего органа. Поскольку она сильно зависит от сферы применения робота, при оценке надежности и удобства обслуживания ее обычно не принимают в расчет. Вместе с тем надежность и производительность робота в значительной мере определяются именно от специфики оснастки. При проектировании рабочего места робота вопрос оснастки может оказаться одним из самых сложных. В гл. 28 приведены анализ и описание конструкций рабочих органов. В настоящей главе они рассмотрены с точки зрения надежности и технического обслуживания.

Рабочий орган робота может оснащаться различными захватами или обрабатывающими инструментами (краскораспылительные головки, сварочные горелки или головки, сверла, шлифовальные круги и т. д.).

Сжатие захватов обычно выполняется механизмом с пневмоприводом. Самые простые захваты работают с деталями круглой или цилиндрической формы, захватывая их по одной. Широкое распространение получили сдвоенные захваты, работающие одновременно с двумя деталями (как правило, ими оснащаются роботы, обслуживающие металлорежущие станки). Для деталей неправильной формы и в случаях, когда изделие меняет форму в процессе обработки, применяются более сложные захваты. Иногда захват должен одновременно выполнять два или даже три действия, для чего он оборудуется несколькими приводами. Вакуумные захваты используются часто, магнитные — несколько реже. Разрабатываются также сложные, «интеллектные» захваты с тактильным очувствлением, например с автоматической регулировкой усилия сжатия и (или) программируемыми характеристиками, изменяющимися в зависимости от размера детали.

К захватам предъявляются следующие требования.

Они должны быть достаточно прочными, поскольку часто подвергаются деформации из-за программных ошибок, слипания деталей, аварийных отказов.

Они должны быть по возможности легкими (что плохо стыкуется с первым требованием). Каждый лишний грамм массы захвата — это потерянный грамм полезной нагрузки.

Они должны обладать достаточной жесткостью и сохранять ориентацию детали при больших перегрузках, возникающих при разгоне и торможении. Собственная точность повторного позиционирования робота теряет смысл, если захват не обеспечивает точности позиционирования.

Иногда в конструкцию захвата должно вводиться устройство пассивной податливости или совмещения, компенсирующее погрешности позиционирования.

Они должны быть быстродействующими. Затраты времени на сжимание и разжимание влияют на длительность цикла и соответственно на производительность.

Их должно быть удобно обслуживать. Рабочие поверхности захвата изнашиваются. Скользящие поверхности опор подвергаются действию инородных материалов и разрушаются. Соединения разбалтываются. У вакуумных присосок изнашиваются края и они начинают «протекать».

Хороший захват отвечает этим требованиям, но это не избавляет его от износа и поломок. Поэтому, несмотря на то что техническое обслуживание захватов не требует больших усилий, им нельзя пренебрегать. Потребуется регулярная смазка. Изношенные детали следует заменять. Особенно это относится к рабочим поверхностям захвата: фасонным губкам, закаленным накладкам и т. п. (их конструкция должна предусматривать быструю замену). При обнаружении повреждений вакуумных присосок они заменяются. Если используются эжекторные устройства, то нужно проверять и регулировать давление подаваемого воздуха. В любом случае, конструкция захвата должна предусматривать быструю замену деталей, по возможности не влекущую за собой перепрограммирование робота.

Большинство перечисленных требований распространяются и на обрабатывающие инструменты, которые даже чаще, чем захваты, являются причиной простоев и снижения качества. Поэтому так важно регулярно проводить техническое обслуживание, содержание которого зависит от типа инструмента. Желательно (а иногда и необходимо) встраивать в программу робота выполнение действий, связанных с техническим обслуживанием. Например, для повышения прочности точечной сварки и во избежание столкновений с деталью следует периодически править электроды сварочных головок. Специальные круги для правки должны располагаться так, чтобы робот мог проводить электроды по их поверхности. Так же обстоит дело и с горелками для газовой сварки, которые при работе засоряются: следует предусмотреть устройства для их автоматической чистки. Это относится и к краскораспылительным головкам.

Ясно, что надежность системы в целом во многом зависит от надежности рабочего органа, а значит, его техническое обслуживание — важная составная часть профилактических работ.

26.3.2. *Планирование технического обслуживания и ремонта*

Правильное планирование и выполнение технического обслуживания невозможны без квалифицированного персонала. Профессиональная квалификация персонала предполагает соответствующее обучение. Его программу нельзя ограничивать обслуживанием и ремонтом оборудования, необходимо, чтобы рабочие знали, как работает система, как ею управлять. Чем лучше это усвоено, тем выше качество технического обслуживания.

Из вышеприведенных рассуждений о коэффициенте готовности и среднем времени восстановления следует, что предприятие должно располагать собственными специалистами по обслуживанию оборудования. Каждая солидная фирма, производящая роботы, имеет обширную сеть служб с высококвалифицированными специалистами, которые всегда могут оказать необходимую помощь. Однако прибегать к их услугам рекомендуется лишь в крайних случаях и по возможности проводить техническое обслуживание самостоятельно. В противном случае восстановление работоспособности оборудования будет отнимать слишком много времени. Самое разумное — использовать специалистов поставщика во время установки и запуска системы. С их помощью персонал предприятия сможет приобрести навыки практической работы, подкрепляющие «базовую», теоретическую подготовку.

Важной частью планирования работы в целом является выбор работников, которые должны пройти курсы повышения квалификации. При наличии профсоюзных организаций список направляемых на подготовку должен согласовываться с ними.

Современный робот состоит из самых разнообразных механических элементов и электронных (электрических) управляющих устройств. Рассуждения о том, какое устройство важнее, лишены смысла: выход из строя любого из них делает робот бесполезным, и в этом плане роботы ничем не отличаются от станков с числовым программным управлением и от любого другого современного технологического оборудования. Известная пословица гласит: «Верблюд — это лошадь, созданная большим коллективом». На нее любят ссылаться те, кто считает, что для обслуживания роботов сегодня привлекается слишком много узких специалистов: электриков, слесарей-наладчиков, электронщиков, гидравликов. Придерживающиеся другого мнения утверждают, что только таким образом можно создать профессионально компетентную группу эксплуатации, а любой другой путь приводит к появлению бригады «шабашников», готовых взяться за любую работу, но не способных выполнить ее качественно. Доля истины есть и в том, и в другом мнении. Какое из них выбрать — зависит от специфики участка, цеха, предприятия. Опыт показал, что обе концепции жизнеспособны, но в последнее время предпочтение все чаще отдается высококвалифицированным специалистам в нескольких областях, способным взять на себя ответственность за работоспособность системы.

26.3.3. *Подготовка кадров для службы эксплуатации и ремонта*

Успешность подготовки кадров зависит от того, насколько руководство предприятия заинтересовано в ее проведении. Такая подготовка должна иметь строго определенные задачи и ориентировать людей на совместное достижение общих целей. Поэтому так важны взаимные контакты между производственными подразделениями. Возможно, это звучит банально, но то и дело предприятия терпят неудачу или достигают гораздо меньших успехов, чем могли бы, из-за плохо налаженных связей между подразделениями и отсутствия четкого плана. Особенно часто это случается при внедрении новых технологий.

Для начала каждый должен уяснить, что за проект предлагается реализовать и для чего. Недостаточное понимание порождает необоснованные опасения (табл. 26.5): высшее руководство сомневается, правильно ли вложило деньги; в технологическом подразделении страшатся, что проект слишком сложен; в отделе

26.5. Страх неизвестного. Средство его преодоления — налаживание контактов

Руководство: правильно ли вложены деньги?
Специалисты-технологи: не слишком ли сложен проект?
Сотрудники отдела сбыта: не сорвется ли график выпуска продукции?
Руководство среднего звена: нужны ли изменения налаженного производственного процесса?
Рабочие: сохранятся ли рабочие места?
Сотрудники отдела технического обслуживания: не слишком ли прибавится хлопот?

сбыта опасаются нарушения графика работы и задержки отгрузки продукции; руководство среднего звена с недоверием относится к изменениям в производственном процессе; рабочие боятся потерять место; отдел технического обслуживания смущают слишком высокие требования.

Эти опасения можно в значительной степени устранить налаживанием хороших контактов. Для начала проводится совещание, на котором обсуждаются проект и необходимость его реализации. Работу нового оборудования можно проиллюстрировать с помощью звукового и графического материала, представляемого поставщиками оборудования. За этим должна последовать серия совещаний в рабочем порядке, на которых разрабатываются конкретные графики работы, определяются все пункты, вызывающие сомнения, отыскиваются «узкие места» и составляется план действий. Вовлечение в эту работу сотрудников всех уровней снижает вероятность возникновения неожиданных ситуаций и порождает уверенность в успехе начатого дела.

В обстановке сотрудничества подразделение технического обслуживания (к которому зачастую относятся без должного внимания) становится полноправным членом коллектива, полностью готовым к выполнению своих функций.

После определения целей технического обслуживания руководитель подразделения может приступить к разработке плана подготовки кадров. Для этого нужно знать, какой квалификации потребуются специалисты, на каких участках имеющейся квалификации недостаточно, кому и какая работа будет поручена и как будет проходить обучение. Крупные фирмы по выпуску оборудования могут организовать соответствующие курсы повышения квалификации с учетом нужд конкретного предприятия. Пример плана подобных занятий

26.6. Промышленные роботы «Юнимейт» серий 1030/2030/4030.

Курс технического обучения «Эксплуатация, программирование и техническое обслуживание»

Курс рассчитан на 4,5 дня занятий с сотрудниками, нуждающимися в повышении квалификации в областях эксплуатации, программирования, технического обслуживания и наладки промышленных роботов «Юнимейт» серий 1030/2030/4030.

Пройти курс рекомендуется, по крайней мере, одному рабочему следующих специальностей в каждой смене: оператор-программист-наладчик, техник-электрик, техник-гидравлик-механик, техник-ремонтник, техник-технолог.

Данный курс может оказаться полезным также проектировщикам систем, конструкторам, технологам и другим специалистам, занимающимся применением роботов.

Программа курса включает в себя:

1. Монтаж оборудования и меры обеспечения безопасности.
2. Ознакомление с пультом управления, пультом-приставкой и способами их использования.
3. Ознакомление с гидравлической, механической и электрической системами и их взаимодействием.
4. Основные приемы поиска и устранения неисправностей с помощью блок-схем, индикаторов состояния и таблиц типовых неисправностей.
5. Изучение приемов составления программ, включая лингвистическое программирование, расчет допусков и использование вспомогательных функций.
6. Изучение способов наладки, включая приемы установки нуля шифраторов, регулировки сервоклапанов, сервоусилителей и зубчатых передач.
7. Изучение приемов профилактического технического обслуживания.
8. Использование средств отладки, редактора и накопителя при программировании, обслуживании и поиске неисправностей.

приведен в табл. 26.6. Заслуживают внимання приведенные рекомендации по отбору специалистов, направляемых на курсы. В некоторых случаях, когда к специалистам предъявляются специфические требования, они должны учитываться и при отборе кадров. Например, в табл. 26.7 приведены рекомендации для отбора персонала, обслуживающего участок точечной сварки кузовов автомобилей.

26.7. Рекомендации по отбору персонала для обслуживания участка точечной сварки кузовов

Обслуживающий персонал этого участка несет ответственность за техническое обслуживание всего оборудования участка, но не общезаводских сетей.

В зависимости от возлагаемой на них ответственности, работники подразделяются на несколько категорий.

Категория А. Работник несет ответственность за функционирование сварочной установки в целом: манипулятора, сварочной головки; контроллера и вспомогательного оборудования.

Категория Б. Работник несет ответственность за работоспособность конкретной подсистемы: гидравлической, пневматической, электропривода, электронных устройств.

Категория В. Работник несет ответственность за регулярное выполнение проверок технического состояния оборудования. Чем больше производственная система, тем нужнее работники этой категории. В их обязанности могут входить мелкий ремонт и наладка. Если это не так, то ремонт и наладку выполняют работники категорий А и Б.

В зависимости от образования, подготовленности и опыта уровень ответственности работника может быть различным.

Уровень 1. Работник несет ограниченную ответственность за работоспособность системы или устройства и ведет его повседневное обслуживание, в случае необходимости прибегая к помощи более квалифицированных работников.

Уровень 2. Работник несет почти полную ответственность за работоспособность системы. Выполняет все работы, не требующие высшей квалификации.

Уровень 3. Работник несет полную ответственность за работоспособность системы и выполняет все работы, с которыми не могут справиться менее квалифицированные работники.

Программа подготовки кадров начинается с направления отобранных людей на курсы (организуемые фирмой — поставщиком роботов или самим предприятием). Руководителю следует подумать о том, как обеспечить дальнейшее обучение и профессиональный рост специалистов. Очень важную роль играет «непрерывное обучение» на предприятии. В его проведении может оказать помощь фирма — поставщик оборудования, предоставляя программы обучения и материалы, построенные на методике программируемого обучения. Такие занятия помогают совершенствовать профессиональное мастерство. Опыт ремонта оборудования находится в обратной зависимости от его надежности по той простой причине, что специалисту редко удается проверить свои знания на практике.

Наряду с занятиями на курсах повышения квалификации и обучением по внутризаводской программе часть сотрудников должна принимать участие в установке оборудования. При этом специалисты не только приобретают дополнительные знания, но и знакомятся с работой оборудования в конкретных условиях. По мере решения вопросов, возникающих у специалистов, ответы на них должны пополнять методические материалы.

Из сказанного ясно, что все пособия, руководства и необходимая документация, поставляемая изготовителем оборудования, должны быть общедоступны. До нелепого смешно, когда нужная справочная литература либо вообще отсутствует, либо находится далеко от того места, где она нужней всего.

26.3.4. График технического обслуживания

Еще до установки и запуска оборудования руководитель подразделения технического обслуживания разрабатывает программу профилактических мероприятий, обсуждает ее с руководителем производственного отдела и обеспечивает все необходимое для ее выполнения. В результате вырабатывается документ, впоследствии уточняющийся в рабочем порядке.

Наряду с пониманием целей и нужд подразделения технического обслуживания, большую роль играет согласованность его деятельности с производством. Даже оптимальный график профилактического обслуживания теряет всякий смысл, если производственный отдел отказывается предоставлять время для его выполнения. Если режим работы системы односменный, то вопроса о времени проведения технического обслуживания ие возникает. Если же она работает в три смены, то приходится планировать профилактические работы на выходные дни или идти на простои в течение одной из смен. Распределение времени должно быть согласовано и зафиксировано документом.

При первоначальном определении перечня работ и периодичности их выполнения рекомендуется следовать рекомендациям фирмы-изготовителя (см. табл. 26.3), особенно в тех случаях, когда подобное оборудование установлено на предприятии

впервые. Руководителю подразделения технического обслуживания следует консультироваться с поставщиком роботов и максимально использовать опыт, накопленный другими. На основе полученной информации составляются перечень необходимых работ и график их выполнения. График должен учитывать специфику конкретного производства. Например, как было отмечено выше, замена или очистка воздушных фильтров при некоторых особенностях окружающей среды должна производиться чаще, чем это рекомендуется изготовителем. Впоследствии может оказаться, что некоторые профилактические процедуры можно проводить реже, но на это можно пойти только после достаточно длительной работы и анализа полученных результатов.

Такой анализ предполагает документирование всей выполняемой работы. Журналы технического обслуживания позволяют обмениваться информацией специалистам, работающим в разные смены. При правильном ведении такие журналы служат исходными данными для определения стратегии и коррекции графика технического обслуживания. В случае необходимости вмешательства поставщика оборудования для устранения серьезных дефектов, ему можно представить полную «историю болезни». При большом объеме полученных данных для их обработки используется ЭВМ.

Независимо от способа обработки значение полученной информации трудно переоценить. Непредвиденные остановки производства создают неразбериху, приносят убытки и «лихорадят» производство. Невозможность определить и окончательно устранить причину неполадок усугубляет положение. Правильное же ведение журналов позволяет разрешить многие проблемы, а иногда и избежать их возникновения.

Следующий этап разработки графика технического обслуживания — это обеспечение специальными инструментами, диагностическим оборудованием и запасными деталями. И в этом случае руководителю следует заручиться поддержкой изготовителя оборудования, который должен передать необходимую информацию в составе поставляемой документации.

Обычно затраты на специальные инструменты невелики, но их отсутствие может привести к потере десятков тысяч долларов, поскольку время — деньги. Как правило, «специальные» инструменты — это съемники для плат, динамометрические ключи, устройства для перекачки смазочного материала, зарядные устройства, специальные ручные тиски и т. п. Этот перечень определяется спецификой установленного оборудования. Пример перечня приведен в табл. 26.8.

26.8. Фрагмент перечня специальных инструментов для технического обслуживания и ремонта роботов «Юнимейт»

Наименование	Примечание
Динамометрический ключ	От 0 до 6 кг·м
Динамометрический ключ	От 5 до 40 кг·м
Выколотка для шпилек	Производства фирмы «Юнимейшн»
Мультиметр	Производства фирмы «Симпсон»
Глубиномер	
Микрометр	
Тестер	Производства фирмы «Юнимейшн»
Ручные тиски	
Поддержка	
Зонд	
Роторный компрессор	
Инструмент для развальцовки пистонов	
Индикатор для регулировки сервоклапанов	

Наряду со специальными инструментами подразделение технического обслуживания должно располагать и необходимым диагностическим оборудованием. Иногда это могут быть универсальные измерительные приборы, калибры и прочие инструменты, возможно, уже имеющиеся в наличии. В противном случае их необходимо закупить, так же как и специальную диагностическую аппаратуру.

Также следует запастись комплектами для профилактического обслуживания, обычно поставляемыми изготовителем оборудования. Имея в распоряжении такие комплекты, не нужно тратить время на подбор деталей и можно быть уверенным, что не придется по нескольку раз возвращаться с места работы на склад за понадобившейся запасной частью. В табл. 26.9 приведен пример перечня деталей, входящих в комплект. Отметим, что туда включены даже бумажные полотенца и копия графика профилактических проверок, предлагаемого изготовителем.

И, наконец, необходимо позаботиться о подготовке запасных частей. Как уже подчеркивалось, секрет высокой работоспособности — в малых затратах времени на восстановление. А достичь этого можно, лишь имея под рукой запасные детали. Даже самый высококвалифицированный специалист не сможет без них ничего сделать. Большинство поставщиков дают рекомендации по формированию запасов деталей, рассчитывая их количество по среднему времени наработки на отказ. Затраты на приобретение необходимых запасных частей в расчете на обслуживание одного или двух роботов могут составить до 12 % от стоимости робота. Для большего количества (10 и выше) роботов затраты снижаются до 5 % и ниже. Следовательно, учет запасных частей представляет собой важную часть работы по техническому обслуживанию. Выше уже приводился пример, где запасы дорогостоящих деталей были рассеяны по всему предприятию и ими практически нельзя было воспользоваться. Это — пример бесцельной траты денег. Запасные детали должны находиться в специально предназначенном месте, и их хранение должно контролироваться с помощью системы учета, которая не только сообщит о местонахождении конкретной детали, но и сигнализирует о необходимости докупить детали, запас которых иссякает. Этим требованием часто пренебрегают, что приводит к слишком большим простоям, несмотря на то что полки завалены инструментами и деталями на тысячи долларов.

26.9. Состав типового комплекта для профилактического обслуживания роботов «Юнимейт»

1. Комплект для профилактического обслуживания 4000 *В*
   а. Воздушный фильтр масляного радиатора
   б. Воздушный фильтр электронного блока
   в. Масляный фильтр в комплекте
   г. Смазка *130АА*
   д. Смазка «Гиашилд *Х*»
   е. Бумажные полотенца
   ж. Жидкость-очиститель в аэрозольном баллоне
   з. Бутылочки для отбора проб масла
   и. Комплект для анализа пробы масла
   к. График профилактического обслуживания
2. Рабочая жидкость для гидравлической системы в канистре
3. Насос для перекачки рабочей жидкости

Хотя расходы на первоначальное приобретение запасных деталей неизбежны, существуют способы минимизации этих затрат при дальнейшей работе. Как уже было сказано, самый главный из них — это учет всего инвентаря. Второй — это незамедлительный возврат замененной детали поставщику для срочного ремонта или замены. Это поможет избежать разрастания запасов деталей на складе.

В-третьих, необходимо максимально использовать возможности восстановления деталей фирмой-поставщиком. В большинстве случаев деталь становится почти как новая, а оплата составляет менее одной трети стоимости новой детали. В аварийных ситуациях при опасности простоя возможна даже незамедлительная доставка фирмой нужной детали по той же частичной цене с последующим возвратом поврежденной детали. Использованию этой удобной, экономящей средства возможности часто мешает чисто психологический момент: в отделе технического обслуживания зачастую не следят за отсылкой вышедшей из строя детали поставщику.

И последнее соображение об обеспечении запасными деталями: не следует забывать о рабочем инструменте роботов. Прекрасно действующий робот без рабочего органа становится бесполезным. Кроме правильной эксплуатации и обслуживания захватов или обрабатывающих инструментов необходимо, чтобы на складе были запасные части к ним. Для особенно сложных или связанных с вредными воздействиями операций целесообразно иметь запасной рабочий орган.

Высказанные соображения подытожены планом мероприятий по техническому обслуживанию (табл. 26.10). Он приведен для того, чтобы подчеркнуть, насколько необходимы тщательно разработанный план и средства для его выполнения. Техническое обслуживание — это коммерческая

26.10. План мероприятий по техническому обслуживанию

1. Ознакомиться с проектом
2. Выработать план подготовки специалистов
3. Определить необходимый уровень квалификации сотрудников
4. Выполнить план подготовки сотрудников
5. Вовлечь работников всех подразделений в монтаж и наладку оборудования
6. Разработать и согласовать планы технического обслуживания
7. Приобрести необходимые запасные детали, инструменты и диагностическое оборудование
8. Разработать план ведения рабочей документации

деятельность, и она требует соответствующего отношения к себе. Было подсчитано, что затраты на обслуживание автоматизированной системы составляют 10 % от стоимости самой системы. По полученным данным для промышленных роботов эта цифра составляет примерно 11 %. Кроме того, профилактическое обслуживание становится основным средством повышения доходов и увеличения производительности. Например, использование методики поставки «точно в срок» для уменьшения запасов деталей на складе возможно только при условии, что каждый механизм, участвующий в производственном процессе, надежно работает все время. В таких условиях быстро выявляются слабые стороны технического обслуживания.

26.4. Безопасность

Применение промышленных роботов является эффективным решением проблемы безопасности. В то же время роботизация порождает специфические задачи обеспечения безопасности, требующие внимания разработчика роботизированных систем.

26.4.1. Решение проблемы безопасности

Роботы могут успешно заменять человека и функционировать в условиях, вредных для человеческого организма. И действительно, на первых этапах развития роботизировались в основном операции, где человек подвергался вредным воздействиям или опасности (например, загрузка вырубных прессов, литье в постоянные формы, обслуживание машин для литья под давлением). Дополнительный импульс для работы в этом направлении дал законодательный акт 1971 г., в котором были выработаны важные стандарты безопасности, минимизирующие риск для работающих. Робототехнические средства обеспечения безопасности не только охраняют жизнь и здоровье работающих, но и совершают полезную работу (в отличие от традиционных средств обеспечения безопасности) [5]. Поэтому робот может оказаться самым экономичным средством обеспечения безопасности рабочего места. Этим аспектом не следует пренебрегать при расчете эффективности применения роботов.

26.4.2. Задача обеспечения безопасности

В настоящей главе преимущественно рассматривались роботизированные установки (системы, состоящие из нескольких компонентов), а не отдельные роботы. Этот подход важен и при решении вопросов безопасности и предупреждения несчастных случаев.

Обычно робот и его рабочий орган взаимодействует с другим оборудованием: станками, конвейерами, зажимными приспособлениями, устройствами загрузки и устройством управления или ЭВМ. В некоторых случаях происходит взаимодействие и с человеком-оператором. Например, оператор может периодически загружать детали в магазин питателя или устанавливать детали в зажимное приспособление для сварки.

Поэтому при оценке безопасности необходимо принимать в расчет и эти аспекты, т. е. учитывать не только защиту жизни и здоровья, но и сохранность дорогостоящего оборудования. Далее, при оценке степени риска нужно рассматривать различные режимы работы системы: рабочий, программирования, технического обслуживания и т. д.

Проведение работ по проблеме безопасности, толчок которым дал указанный выше законодательный акт, привело к разработке методик и средств предупреждения несчастных случаев для большинства видов промышленного оборудования. При этом тщательно рассматривались ситуации, при которых возможны запутывание оператора в кабелях, захват оборудованием пальцев и(или) конечностей, ударные воздействия, выброс расплавленного металла, электрический удар, высокотемпературное воздействие и другие ситуации. Все это относится как к роботизированным рабочим ячейкам, так и к автономному роботу. Однако некоторые особенности роботов и их взаимодействие с другим производственным оборудованием требуют отдельного рассмотрения.

26.4.3. Робот

Ассоциация производителей роботов и другие организации определяют понятие «робот» как позиционно-управляемый «*перепрограммируемый многофункциональный* манипулятор, предназначенный для перемещения материалов, деталей, инструментов или специальных устройств путем совершения *различных* ранее заданных движений с целью выполнения различных операций».

С точки зрения безопасности ключевыми являются слова, выделенные курсивом — *перепрограммируемый*, *многофункциональный*, *различных*,— поскольку именно они определяют некоторую «запланированную непредсказуемость» в действиях робота. Например, можно в течение получаса наблюдать, как робот раз за разом выполняет одни и те же действия, после чего он вдруг начинает движение в совершенно другом направлении: был получен сигнал, по которому изделие должно быть отбраковано.

В большинстве случаев выполнение операций не требует от робота максимального использования его возможностей. И повторяющиеся действия могут создать ошибочное впечатление, что это все, на что робот способен.

Поэтому в первую очередь необходимо остерегаться следующего: выхода частей робота в неограждённое пространство; усыпляющего бдительность, «гипнотизирующего» своей монотонностью характера движений; явных связей (типа «блокировка — взаимодействие», вызывающих выполнение альтернативных действий и подпрограмм.

26.4.4. Средства обеспечения безопасности

Хорошо спроектированный робот должен быть снабжен всеми возможными средствами обеспечения безопасности с учетом разных режимов: рабочего, программирования и технического обслуживания [6]. Некоторые из этих средств универсальны, другие зависят от типа робота, особенно от его мощности.

В рабочем режиме большинство этих средств обеспечивает защиту оборудования (предполагается, что приняты меры, чтобы человек не смог проникнуть в рабочее пространство). Обычно между роботом и механизмами, с которыми он взаимодействует, обеспечивается блокировка, подающая сигнал готовности или безопасного взаимного положения оборудования и т. п. В управляющей программе робота значения поступающих сигналов должны опрашиваться в надлежащей последовательности. Например, робот не должен начинать работу с прессом, пока не подан сигнал, что пуансон поднят. Соответственно и пресс приводится в движение только после отведения манипулятора. Аналогично робот должен брать заготовку из устройства ориентации лишь в том случае, когда датчик подтверждает наличие заготовки и правильность ее положения.

В некоторых случаях применяются оптические или инфракрасные датчики, например с их помощью контролируется снятие детали с технологического оборудования. Другой пример — установка оптического датчика на захват робота, обслуживающего литейную машину. Его применение позволяет избежать повреждения дорогостоящих литейных форм. В других случаях независимо от управляющей программы робота обрабатываются сигналы, приходящие от всех периферийных устройств. Например, до того, как конвейер линии точечной сварки автомобильных кузовов переместится на следующую позицию, от всех роботов должны быть получены сигналы о завершении рабочего цикла и отводе манипулятора. Без этой меры предосторожности манипуляторы роботов могут повредить кузов.

Возможно, это покажется тривиальным, но, чтобы избежать простоев и повреждения дорогостоящего оборудования, при разработке системы блокировки следует почаще задаваться вопросом: «а что будет, если...?». Не один манипулятор был сломан при случайном срабатывании пресса, и немало инструмента было испорчено из-за неправильной установки детали. Очевидно, что надежность датчиков должна быть достаточно высокой. Ложные срабатывания недопустимы. Для этого требуется соответствующее техническое обслуживание.

Необходимо также проанализировать реакцию всей системы в случае прерывания производственного процесса, аварийного останова или неполадок в электрооборудовании и попытаться избежать возможных последствий. Например, большая часть роботов может быть переведена в состояние блокировки, т. е. мгновенной остановки движения, или в режим пошагового выполнения команд, при котором робот только завершает выполнение начатой команды и останавливается в ожидании следующей команды. Желательно иметь такую возможность. Но следует еще раз подчеркнуть, что при проектировании системы блокировки нужно предусмотреть, чтобы завершение начатого цикла работы не привело к столкновению различных частей оборудования.

Аналогичный анализ должен быть проведен и для случаев аварийного останова и сбоя силового напряжения. Это не так просто, поскольку эти события носят случайный характер и реакция на них может быть практически непредсказуемой (например, случайное срабатывание переключателей). Одним из проявлений этого может быть отключение питания системой обеспечения безопасности при проникновении человека в рабочую зону. Хотя самое главное — это безопасность людей, не следует забывать о способах уменьшения возможного ущерба для оборудования.

При правильном проектировании робота в его состав вводятся и другие средства обеспечения безопасности, сложность которых зависит от устройства робота. Они

призваны нейтрализовать влияние сбоев в системах самого робота. Для роботов, управляемых с помощью ЭВМ, это устройства контроля четности, контрольного суммирования, избыточного кодирования, самообнаружения ошибок и т. п. Должны быть предусмотрены и программные остановы, электрические пороговые ограничители, а также концевые выключатели, устанавливаемые применительно к конкретной рабочей ячейке.

При остановке робота и в режиме программирования создается ряд условий, непосредственно угрожающих безопасности человека. В большинстве случаев оператору приходится находиться в пределах рабочего пространства робота. Для роботов, управляемых ЭВМ, программа может быть введена в автономном режиме с клавиатуры терминала. Однако задание точного положения в пространстве выполняется с помощью ручного пульта-приставки и, как правило, требует приближения оператора к манипулятору. Поскольку большинство роботов этого класса имеют электромеханический или гидравлический привод, далее рассматриваются устройства этих типов.

Подобные роботы могут перемещать груз массой 140 кг со скоростями порядка 150 см/с, поэтому любому, кто окажется в зоне их действия, может быть нанесена серьезная травма. Это подчеркивает важность роли средств обеспечения безопасности в режимах программирования и обучения. Прежде всего в режиме обучения необходимо ограничение по скорости и прикладываемой энергии. Они должны быть уменьшены до такого значения, чтобы оператор мог успеть отреагировать на непредвиденные перемещения манипулятора и избежать травмы. Обычно в режиме обучения скорость ограничивается одной десятой ее полного значения, что достигается за счет изменения параметров электрической цепи. Однако может случиться, что будет приложено полное напряжение. Один из способов избежать этого — надежное ограничение потока рабочей жидкости и, как дополнительная мера предосторожности, присоединение гидравлических предохранителей, которые быстро «почувствуют» увеличение потока и обеспечат останов агрегата. На практике в критической ситуации подобные системы ограничивают перемещение манипулятора до 2 см. Для роботов с электромеханическим приводом это достигается подключением к менее мощному источнику питания (кстати, проверка этих средств по возможности должна входить в профилактическое обслуживание).

Такой подход к проектированию роботов призван свести к абсолютному минимуму число компонентов, неисправность которых может привести к травмам. Для примера возьмем робот с сервоуправляемым гидравлическим приводом. Даже при обучении используются его системы сервоуправления и их неисправность может привести к непредвиденным движениям манипулятора. Если в то же самое время отказ в электронных или электрических цепях приведет к возрастанию скорости (и мощности), человек может быть травмирован. Или отказ сервоклапана может привести к резкому возрастанию потока жидкости. Существует масса явлений, которые в принципе могут привести к несчастным случаям. Используя абсолютный ограничитель потока и датчик для аварийного отключения, можно устранить последствия большинства этих явлений.

Никто не говорит о том, что не следует использовать резервирование. Напротив, это высокоэффективный конструкторский прием, если он не уменьшает общую надежность мер обеспечения безопасности.

Другими средствами обеспечения безопасности работы в дополнение к вышеупомянутому являются переключатели «Стоп» на пульте обучения и вынесенные кнопки аварийного останова. В табл. 26.11 перечислены наиболее часто используемые средства.

Вышеперечисленные аспекты безопасности робота дополняются некоторым заслуживающими внимания приемами, применяемыми на этапах установки и программирования системы. Без них понимание проблемы обеспечения безопасности в рамках роботизированной ячейки будет неполным.

Во-первых, сама оснастка рабочего органа требует осторожного обращения (острые грани и т. д.). К тому же, из-за ошибки оператора или сбоя в работе оборудования деталь может выпасть из захвата. Поэтому до тех пор, пока нельзя полностью предохранить оператора от факторов риска, меры техники безопасности совершенно обязательны, так же как и соответствующее обучение персонала.

Во-вторых, во время введения программы все остальное оборудование рабочей ячейки должно быть отключено. Для предотвращения его случайного включения либо непосредственно в системе управления робота, либо в центральном управлении должна быть предусмотрена соответствующая блокировка.

В-третьих, пробный прогон программы должен проводиться с теми же предосторожностями, как и в рабочем режиме. Даже если была сделана проверка на малых скоростях, с пошаговым выполнением и контролем, средств обеспечения безопасности режима обучения будет недостаточно.

26.11. Некоторые средства обеспечения безопасности роботов

Переключатель отключения питания	Отключает подачу питания в распределительной коробке
Индикатор питания	Сигнализирует о подводе питания к соединительной коробке робота
Кнопка «СЕТЬ»	Подключает робот к сети
Кнопка питания блока управления	Подключает питание только к блоку управления
Кнопка подвода питания к манипулятору	Подключает питание только к манипулятору
Кнопка «СТОП»	Отключает питание от манипулятора и блока управления
Переключатель «ОСТАНОВ»/«ПРОДОЛЖЕНИЕ»	Останавливает перемещение манипулятора при включенном питании
Курок пульта-приставки	В режиме «обучение» должен удержаться оператором в нажатом состоянии
Кнопка «ШАГ»	Переводит исполнение программы в пошаговый режим
Управление с уменьшенной скоростью	Уменьшает скорость исполнения программы
Переключатель режимов «ОБУЧЕНИЕ»/«ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ»	Позволяет оператору выбрать нужный режим
Сброс программы	Выводит систему из режима воспроизведения
Индикаторы состояний и сообщений	Обеспечивают визуальный контроль состояния системы с помощью световой сигнализации и сообщений на экране дисплея
Контроль четности, обнаружение ошибок	Вычислительные средства для самоконтроля различных функций
Тормоз сервомотора	Фиксирует положение манипулятора
Гидравлический «предохранитель»	Обеспечивает защиту от перемещения с высокой скоростью и перегрузкой в режиме обучения
Программные ограничители	Задаваемые устройством управления ограничения перемещений
Аппаратные ограничители	Управление диапазоном перемещений
Ручной (автоматический) сброс	Обеспечивает средства для сбрасывания давления в гидравлической (пневматической) системах
Удаленное включение	Позволяет выполнять управление основными функциями робота и средствами обеспечения безопасности с удаленного пункта

В-четвертых, отработку программы должны проводить два человека — один вводит программу, другой находится около кнопки аварийного выключения и наблюдает за происходящим.

Таким образом, были рассмотрены средства обеспечения безопасности в режимах работы и обучения. Осталось обсудить третий режим — техническое обслуживание робота. Эта работа (в особенности обнаружение неисправности и ремонт) должна проводиться при строжайшем соблюдении всех мер предосторожности — и указанных в руководстве, и разработанных отделом технического обслуживания предприятия. В табл. 26.12 приведен пример инструкций из руководства изготовителя. За этой вводной частью следует несколько страниц общих указаний, касающихся того, что следует и что не следует делать (шрифтом выделены все предупреждения и предостережения). Особенно ими изобилуют разделы об обнаружении неисправностей и замене деталей.

Средства обеспечения безопасности при техническом обслуживании робота зависят от типа привода. В любом случае, будь то гидро-, пневмо- или электромеханический привод, оборудование должно соответствовать стандартам.

К средствам, специально предназначенным для технического обслуживания, относятся ручной или автоматический, гидравлический или пневматический сбрасыватель давления, муфты сцепления на электромоторах и специальная система управления, отключающая привод манипулятора. По крайней мере, для одного робота с сервоуправлением изготовитель поставляет пульт ручного управления (рис. 26.5), который позволяет оператору перемещать звенья

26.12. Положения, касающиеся безопасности (выделены шрифтом в руководстве по эксплуатации оборудования)

Отрывок из руководства пользователя.

1. С настоящим документом обязательно должны быть ознакомлены все сотрудники предприятия, работающие внутри или поблизости от рабочей зоны робота «Юнимейт» (см. рис. 2.2).

Невозможно правильно и безопасно эксплуатировать, или проводить техническое обслуживание робота, просто имея под рукой соответствующее руководство, как невозможно правильно и без риска для жизни управлять самолетом, работать на токарном станке или ремонтировать сложное транспортное устройство, всего лишь прочитав инструкцию.

Настоящее руководство предназначено для пользователей, прошедших курс занятий, проводимых отделом подготовки фирмы «Юнимейшн» и имеющих основные навыки работы с роботом «Юнимейт».

Настоящее руководство **НЕЛЬЗЯ** рассматривать как самоучитель по овладению работой с роботом.

Пренебрежение вышеизложенными и нижеследующими предупреждениями может привести к серьезным травмам и (или) значительному повреждению робота.

2. В руководстве использованы три вида выделения особо важных моментов. Ниже они проиллюстрированы в порядке уменьшения значимости:

Предостережение

Означает, что при невыполнении соответствующих правил, персонал может получить серьезные травмы, а роботу могут быть нанесены значительные повреждения.

Предупреждение

Таким образом, выделенное слово говорит о возможности повреждения робота.

Замечание

Используется для дополнительной информации или для подчеркивания важности положения, процедуры, функционального контроля и т. п.

манипулятора без подачи напряжения питания на систему управления робота. В дополнение к этим встроенным средствам изготовитель обеспечивает приспособления для технического обслуживания (инструменты и фиксаторы), удовлетворяющие требованиям техники безопасности.

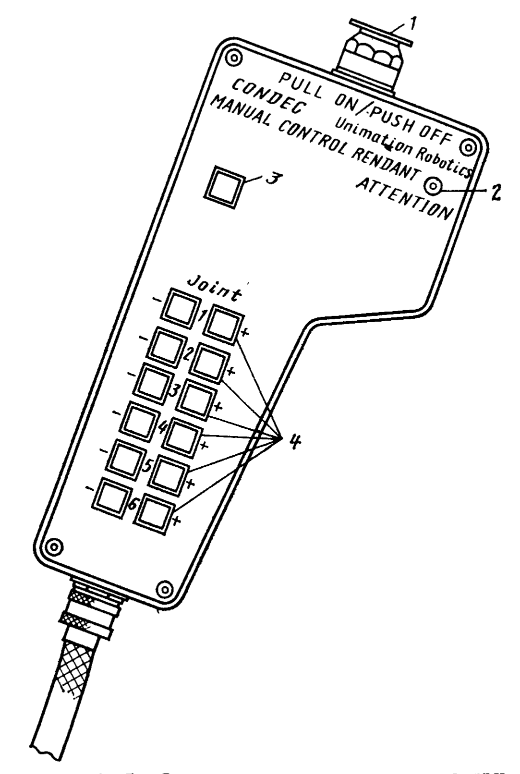


Рис. 26.5. Органы управления пульта-приставки:

1 — аварийный выключатель; *2* — индикатор готовности; *3* — сброс давления рабочего тела; *4* — управление звеньями

26.4.5. Средства обеспечения безопасности в роботизированных ячейках

Разработка мер профилактики несчастных случаев требует оценки возможных и реальных опасностей и в силу этого зависит от конкретного оборудования и технологического процесса. Поэтому при оценке факторов риска следует стремиться к следующему: определить источники опасности; обеспечить защиту от этих опасностей; постараться избежать излишних затрат и усложнения конструкции.

Оценка факторов риска — задача довольно сложная, и этой теме посвящено несколько публикаций.

При анализе роботизированной ячейки в первую очередь следует оценить, может ли робот нанести травму оператору. При обсуждении проблемы безопасности рассматривались в основном мощные роботы, но существует и большое число небольших

роботов, практически не представляющих опасности для здоровья и жизни человека. Они не требуют разработки мер предосторожности. Для несложных операций оценка факторов риска, анализ блокировки средств сопряжения и последствий их отказа не представляют сложности.

В сложных системах, включающих в себя мощные роботы и технологическое оборудование, оценка факторов риска затруднительна и требует методического подхода и большой доли здравого смысла. Ассоциация поставщиков станков Великобритании опубликовала хорошее руководство «Безопасность промышленных роботов» [7], в котором предлагается следующая схема оценки факторов риска.

А. Определить режим работы, т. е. рабочий, обучения или технического обслуживания.

Б. Выявить опасные зоны.

В. Определить, какое поведение системы рассматривается: штатное или аварийное.

Г. Определить, могут ли выявленные факторы риска явиться причиной травмы.

Д. Если да, то необходимо рассмотреть известные методы защиты применительно к конкретному оборудованию. В настоящее время большинство типовых решений годятся для сопряженного с роботом оборудования, но не для самих роботов.

Е. Рассмотреть возможность применения этих методов для конкретного оборудования, связанного с роботами. Например, оценка факторов риска для одного и того же станка, управляемого человеком и роботом, будет различной. Один из моментов, от которых зависит степень риска: может ли оператор взять на себя управление, например, при отказе робота.

Ж. Если типовых решений нет, следует продумать, что необходимо для их разработки в конкретном случае.

З. Определить, могут ли быть использованы постоянные заграждения.

И. Если нельзя использовать стационарные средства защиты, необходимо предусмотреть блокировку. Следует определить тип системы блокировки, эффективный в данных условиях. Система блокировки должна обеспечивать высокий уровень надежности защиты и возможность регулярного проведения технического обслуживания и проверок. Необходимо тщательно оценить эффективность любой следящей системы.

К. Анализ аварийного поведения системы проводится в том же порядке — рассматриваются источники возможной опасности и оценивается степень риска. Определить источник опасности бывает довольно сложно, поскольку он возникает только при отказе какой-либо части системы (например, системы управления). Альтернативой создания защиты в таких случаях может быть повышение безопасности работы системы управления при сохранении блокировки на случай «запланированных» отклонений в поведении.

Л. После того как разработаны отдельные меры защиты, необходимо снова произвести оценку общей безопасности системы. Если опасность удалось снизить или ликвидировать, то оценка степени риска проводится заново. В большинстве случаев (в особенности там, где опасность высока) при разработке системы защиты следует рассматривать наихудший вариант. Неразумно возлагать все функции обеспечения безопасности на управляющую ЭВМ. Это допустимо только после тщательного анализа всех факторов риска, а такая задача выходит за пределы компентеции большинства пользователей.

М. По окончании анализа работы в режимах обучения, воспроизведения и технического обслужнвания производится взаимная увязка необходимых для каждого из режимов защитных блокировок (и в аспекте функционирования, и в аспекте обеспечения безопасности). Необходимо уделить внимание органам аварийного отключения.

Н. Необходимо тщательно фиксировать все, касающееся анализа, принимаемых решений и методики работы по анализу опасностей, оценке факторов риска и сохранения безопасности, требований технического обслуживания и т. д.

26.4.6. Обеспечение безопасности в процессе проектирования

Средства защиты составляют неотделимую часть рабочей ячейки и должны быть предусмотрены уже на этапе разработки ее проекта. В противном случае это может повлечь за собой излишние затраты в дальнейшем и снизить эффективность мер обеспечения безопасности. Методика проектирования может быть, например, следующей.

А. Разрабатывается схема размещения всего оборудования. Обычно требуются изображения горизонтальной и профильной проекций.

Б. Вокруг рабочей ячейки следует разместить ограждение, предотвращающее попадание людей и механизмов (например, автопогрузчиков) в рабочее пространство. Если это возможно, следует использовать неподвижное оборудование в качестве элементов ограждения. Необходимо убедиться в том, что все пульты и панели управления доступны и удобно расположены, особенно

органы запуска и отключения. Следует предусмотреть возможность доступа в рабочую зону для замены и установки инструмента, доставки и вывоза палет с деталями, обеспечить место для ручной загрузки и разгрузки и т. д., а также для проведения работ по техническому обслуживанию.

В. Следует оценить, не приведет ли использование концевых выключателей и стопоров к упрощению или улучшению системы безопасности и экономии используемой площади. После этого можно откорректировать схему размещения.

Г. Следует разработать систему блокировки и взаимодействия между всеми элементами ячейки, включая защитную блокировку оборудования и входа в огражденную зону. Предусматривается резервирование защитных блокировок (например, в дополнение к блокировке входа для остановки работы ячейки могут быть использованы отключающие устройства — оптические датчики и электромагнитные экраны). Следует установить замки на входе в зону для ограничения доступа посторонних лиц.

Д. Следует убедиться в том, что все предусмотренные меры безопасности достаточно надежны.

Е. Необходимо предусмотреть устройства для звуковой и визуальной индикации режима работы ячейки (надписи, вспыхивающие лампочки) и сигнализацию тревоги.

Ж. Следует еще раз со всех сторон обсудить окончательный проект с представителями технологической и производственной служб, служб технического обслуживания и техники безопасности, а также при необходимости и с другими лицами.

Наряду с предлагаемой методикой возможны и другие подходы. Главное, чтобы вопросы безопасности рассматривались в комплексе с остальными, а их важность осознавалась всеми подразделениями.

Не следует забывать и о более простых мерах предупреждения несчастных случаев, таких, как соответствующее освещение, предупредительная разметка, предупреждающие надписи, световая сигнализация.

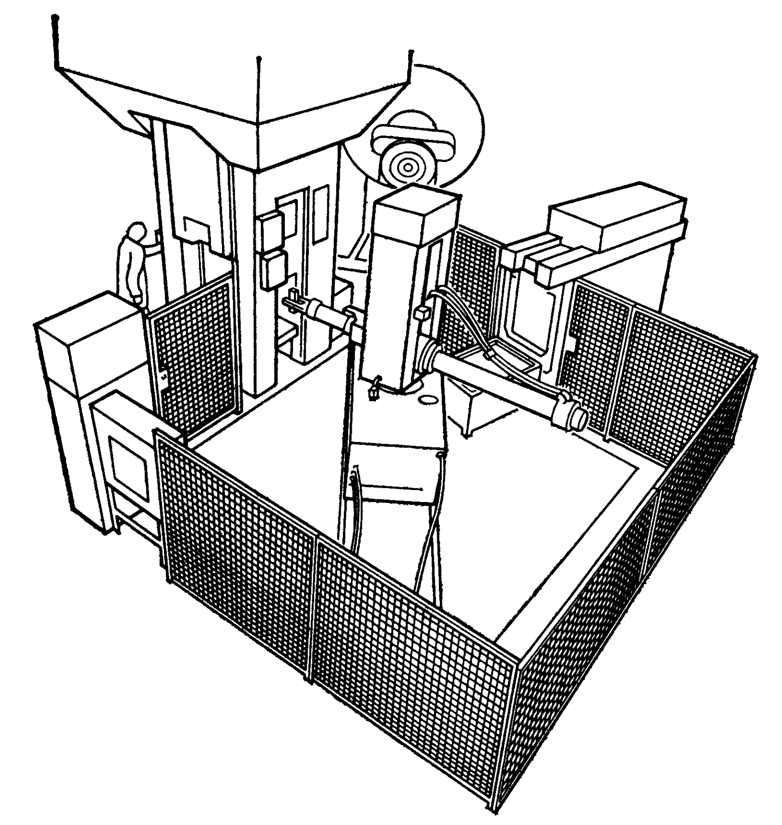


Рис. 26.6. Пример защитного ограждения рабочей ячейки (с разрешения Ассоциации пользователей станочного оборудования)

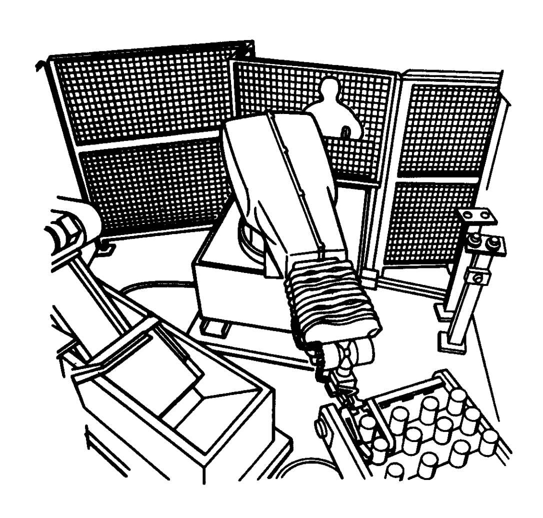
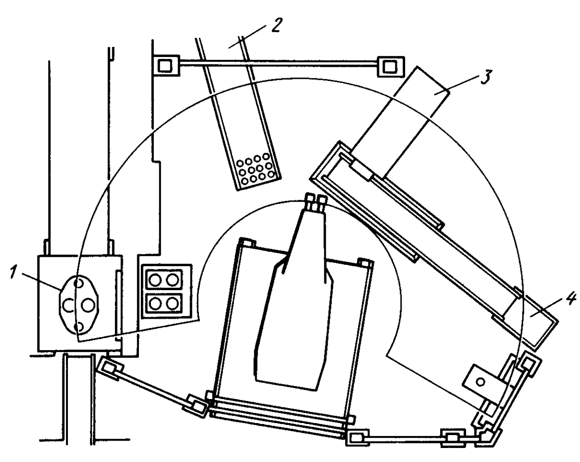


Рис. 26.7. Защитное ограждение частично образуется оборудованием ячейки:

1 — машина для литья под давлением; *2* — входной транспортер; *3* — готовые отливки; *4* — пресс (с разрешения Ассоциации пользователей станочного оборудования)



Известен случай, когда для предупреждения возможной путаницы и ошибок операторов все устройства и относящиеся к ним блоки управления раскрашивались в разные цвета.

Следует отметить, что установка защитных барьеров и ограждений представляет уже известное, проверенное решение и, как правило, является необходимым. Независимо от других принимаемых мер для этого есть несколько оснований.

Само существование ограждений (при соответствующей раскраске) является предупреждением даже для тех, кто не знает, что они загораживают. Не забудьте о «гипнотизирующем» действии монотонных движений робота.

Установка защитных ограждений гарантирует, что внутрипроизводственный транспорт не заедет случайно в опасную зону.

Правильная блокировка входа влечет за собой упорядочение доступа в рабочую зону. При этом исключается несанкционированное вмешательство в работу оборудования.

Правильно спроектированное ограждение предотвратит (или, по крайней мере, уменьшит) опасность того, что какой-либо объект (деталь) выкатится или даже вылетит из рабочей зоны.

Иногда требуется использовать другие, специфические типы ограждений и защитных экранов. Чаще всего применяются защитные очки, предохраняющие глаза при роботизированной сварке. Иногда вместо них используются экраны из специального материала, которым можно легко закрыть зону сварки. Аналогичные меры требуются и при роботизированной окраске. Поскольку при работе обязательно используются различные распылительные камеры и си-

стемы вытяжной вентиляции, вопрос обеспечения безопасности частично разрешается сам собой.

С применением роботов в новых областях возникают и новые проблемы. Например, работы стали использовать для лазерно-лучевой сварки и резки. Необходимо проводить оценку степени риска и разработку мер предупреждения несчастных случаев в каждом отдельном случае. Для решения этих вопросов нужны знание предмета и здравый смысл.

На рис. 26.6 и 26.7 показаны защитные ограждения. На рис. 26.13 следует обратить внимание на то, что роль части ограждения играет оборудование для литья и выдавливания. Важно, чтобы элементы ограждения плотно примыкали друг к другу, не оставляя места для прохода человека. Этими же соображениями определяется высота ограждения и зазор между ним и полом. Отметим, что пульт управления выносится за пределы огражденной зоны. Это позволяет оператору выключать оборудование перед входом в рабочую зону, обеспечивая тем самым его сохранность и собственную безопасность.

В конечном счете, надежность работы системы обеспечения безопасности зависит от тех, кто ее разрабатывает и эксплуатирует. Процедура приемки системы обязательно должна включать в себя проверку работы всех встроенных средств обеспечения безопасности — робота, связанного с ним оборудования, систем управления и блокировки входа в огражденную зону, средств подачи сигнала тревоги. Такая оценка работоспособности должна проводиться в соответствии с поставляемой документацией. Впоследствии проверка систем обеспечения безопасности должна регулярно повторяться. Только это дает гарантию, что ни одна из этих систем не утратила работоспособность.

26.5. Заключение

В начале настоящей главы было отмечено, что три составляющие робототехники — надежность, техническое обслуживание и безопасность — составляют важнейшее условие выпуска высококачественной продукции в срок и с наименьшими затратами. Если сначала это утверждение не казалось очевидным, то после всего изложенного выше оно не должно вызывать сомнений.

Надежность должна быть заложена в конструкции робота. Она характеризуется средним временем наработки на отказ, коэффициентом готовности и простотой технического обслуживания.

Единственный способ обеспечить высокий коэффициент готовности — это проводить программу профилактического обслуживания. Для этого необходимы поддержка руководства, подготовленный персонал и наличие запасных деталей.

Конструкции всех видов оборудования и роботизированная система в целом должны обеспечивать максимальную безопасность, причем от безопасности системы зависит ее производительность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Asimov, I., *I, Robot*, Doubleday, New York, 1950.
2. Engelberger, J. F., *Robotics In Practice*, AMACOM, New York, 1980.
3. Kapur, K. C., and Lamberson, L. R., *Reliability in Engineering Design*, Wiley, 1977.
4. The High Cost of Bad Maintenance, *Dun's Review*, August 1979, pp. 51—52.
5. Willson, R. D., How Robots Save Lives, *Society of Manufacturing Engineers*, MS82—130, 1982.
6. Barrett, R. J., Bell, R., Hudson, P. H., *Planning for Robot Installation and Maintenance: A Safety Framework*, *Proceedings of the 4th British Robot Association Annual Conference*, Brighton, U. K., May 18—21, 1981.
7. *Safeguarding Industrial Robots, Part 1, Basic Principles*, The Machine Tool Trades Association, 63 Bayswater Road, London W2 3PH, 1982.

Список дополнительной литературы

Pollard, B. W., "RAM" for Robots (Rèliability, Availability, Maintainability), Society of Manufacturing Engineers, MS80—692, 1980.

Engelberger, J. F., Industrial Robots: Reliability and Serviceability, presented at a conference on robots in Munich, Germany, November 1972.

Engelberger, J. F., Designing Robots for Industrial Environment, Society of Manufacturing Engineers, MR76-600, 1976.

Kapur, K. C., Reliability and Maintainability, in Salvendy, G., Ed., *Handbook of Industrial Engineering*, Wiley, 1982, Ch. 8.5.

The Race to the Automatic Factory, *Fortune*, February 21, 1983, pp. 52—64.

Macri, F. C., Analysis of First UTD (Universal Transfer Device) Installation Failures, Society of Manufacturing Engineers, MS77—735, 1977.

Howard, John M., Human Factors Issues in the Factory Integration of Robotics, Society of Manufacturing Engineers, MS528—127, 1982.

Industry's Man in the Middle, *Iron Age*, January, 21, 1983, pp. 36—38.

Preventive Maintenance: An Essential Tool for Profit, *Production*, July 1979, pp. 83—87.

ICAM Robotics Application Guide, Technical Report AFWAL-TR-80-4042, Vol. 2, Wright Patterson Air Force Base, Ohio, April 1980.

Worn, H., Safety Equipment for Industrial Robots, *Robots IV Conference*, 1979.

Robot Safety: In a State of Flux and a Jungle, *Robot New International*, December 1982.

Hasegawa, Y., Industrial robot application model design for labor saving and safety promotion in press operations, *Proceedings of the 4th ISIR*, 1974.

Hasegawa, Y., A summary report on FOLS (Foundry Labor Saving and Safety Promotion) Research Project (in Japanese), *Robot*, No. 13, 1976.

Hasegawa, Y. and Sugimoto, N., Industrial safety and robots, *Proceedings of the 12th ISIR*, 1982, pp. 9—20.

McKinnon, R., Robots — are they automatically safe? *Protection*, Vol. 17, No. 5, 1980.

Worn, H., Sicherheitssysteme bei industrierobotern, *Sicherheitstechnik* (in German), No. 5, 1981.

Глава 27
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДУЛЬНЫХ РОБОТОВ

М. Сиаки, г. Витри-Сюр-Сен, Франция

27.1. Концепция модульности роботов

Модульные роботы создаются из стандартных независимых блоков и используют одну систему управления. Каждый модуль имеет встроенное управляющее устройство, блок питания и устройство связи. Различные модули могут объединяться с помощью стандартных средств сопряжения. Это позволяет строить различные кинематические структуры, наиболее полно отвечающие конкретным требованиям. Например, отпадает необходимость закупать универсальный робот с пятью или шестью ступенями подвижности там, где требуются только две. Модульные роботы выгодны и производителю, и пользователю. Для пользователя робота наиболее привлекательны следующие особенности.

Эффективность. Используется не универсальный робот, а специально созданный для конкретного приложения.

Использование всех возможностей робота. Модульный робот не является избыточным.

Средства вкладываются только в действительно нужное оборудование.

Простота обучения персонала. Стандартные модули легче осваивать.

Простота технического обслуживания. Стандартные модули легче обслуживать и можно использовать стандартные запасные детали.

Расширение или изменение структуры робота в соответствии с новыми требованиями за счет использования дополнительных модулей.

С точки зрения изготовителей модульные роботы дают следующие преимущества.

Возможность наиболее полно удовлетворить нужды покупателя, компонуя робот по предварительному заказу.

Удобство изготовления и учета благодаря использованию стандартных и уже готовых модулей.

Удобство обучения и технического обслуживания.

Удобство сбыта.

27.2. Конструирование модульных роботов

Каждый модуль, входящий в состав модульного робота,— это независимый автономный механизм, который может быстро и с минимальной наладкой присоединяться к другим модулям в соответствии с требованиями конкретного приложения. Модульность подразумевает, что отдельные модули проще и, следовательно, надежнее, чем универсальный робот. На рис. 27.1 показано, как, комбинируя семь базовых моду-

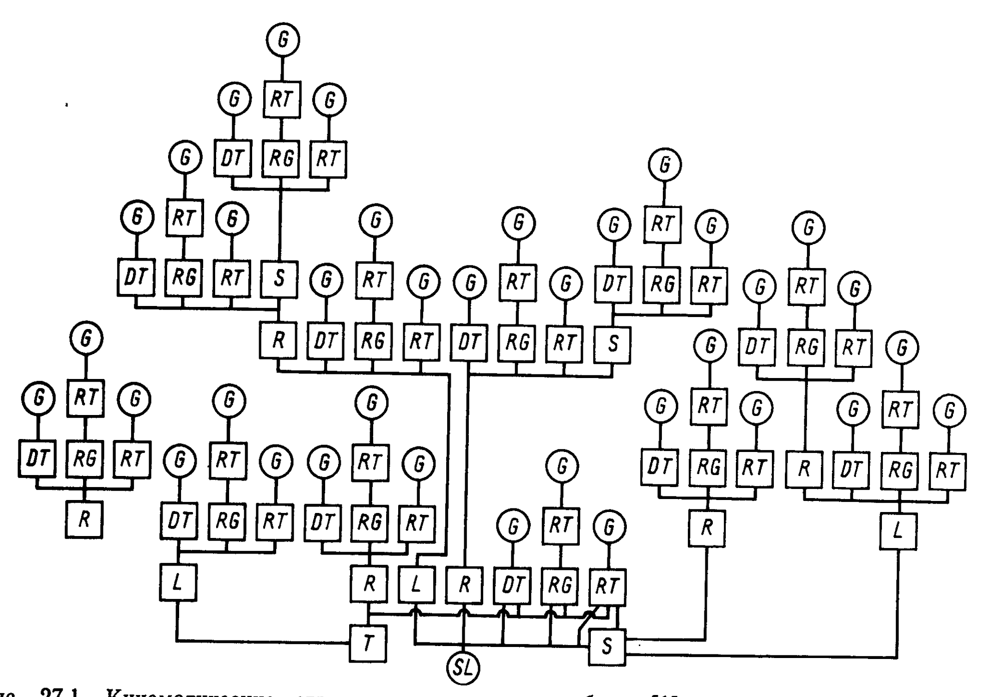


Рис. 27.1. Кинематические структуры модульных роботов [1]:
SL — неподвижное звено; *T* — каретка; модули: *S* — поступательного движения; *L* — подъема-опускания; *R* — вращения; *DT* — шарнирный; *RG* — качения; *RT* — телескопический; *G* — захват

лей, легко получить 39 различных кинематических структур.

При проектировании модульных роботов возникает два специфических затруднения: эффективная организация привода и связи и эффективная организация управления системой в целом.

В настоящее время серийно выпускаются несколько семейств модульных роботов с пневмо-, гидро- и электромеханическими приводами.

27.2.1. Электромеханический привод

Модули с электромеханическим приводом используются преимущественно там, где требуются плавные движения при сравнительно невысоких значениях предельной нагрузки и моментов вращения, например, для выполнения сборки. На рис. 27.2 изображены пять вариантов построения робота из модульных компонентов с приводом от двигателей постоянного тока. Конструкция манипулятора обеспечивает высокую подвижность в горизонтальной плоскости при сохранении жесткости в вертикальном направлении. Роботы, показанные на рис. 27.2, могут развивать скорость до 1,4 м/с. Базовая конфигурация с 2 степенями подвижности может работать с деталями массой до 7 кг. При наращивании количества модулей предельная нагрузка существенно снижается: для конструкции, имеющей 4 степени подвижности, она уменьшается до одной трети первоначального значения. Управление осуществляется с помощью микроЭВМ, точность повторного позиционирования 0,05 мм.

27.2.2. Гидравлический привод

На рис. 27.3 показаны гидравлические модули и варианты их компоновки. Данный тип модулей применяется при больших предельных нагрузках и моментах вращения. Примеры его применения описываются в следующем разделе. Роботы, построенные из модулей данного типа обеспечивают скорость перемещения 0,5—0,8 м/с при максимальной грузоподъемности около 50 кг и точности повторного позиционирования 1 мм.

27.2.3. Пневматический привод

Модули с пневматическим приводом представлены на рис. 27.4. Их типичная компоновка обеспечивает 1—4 степени под-

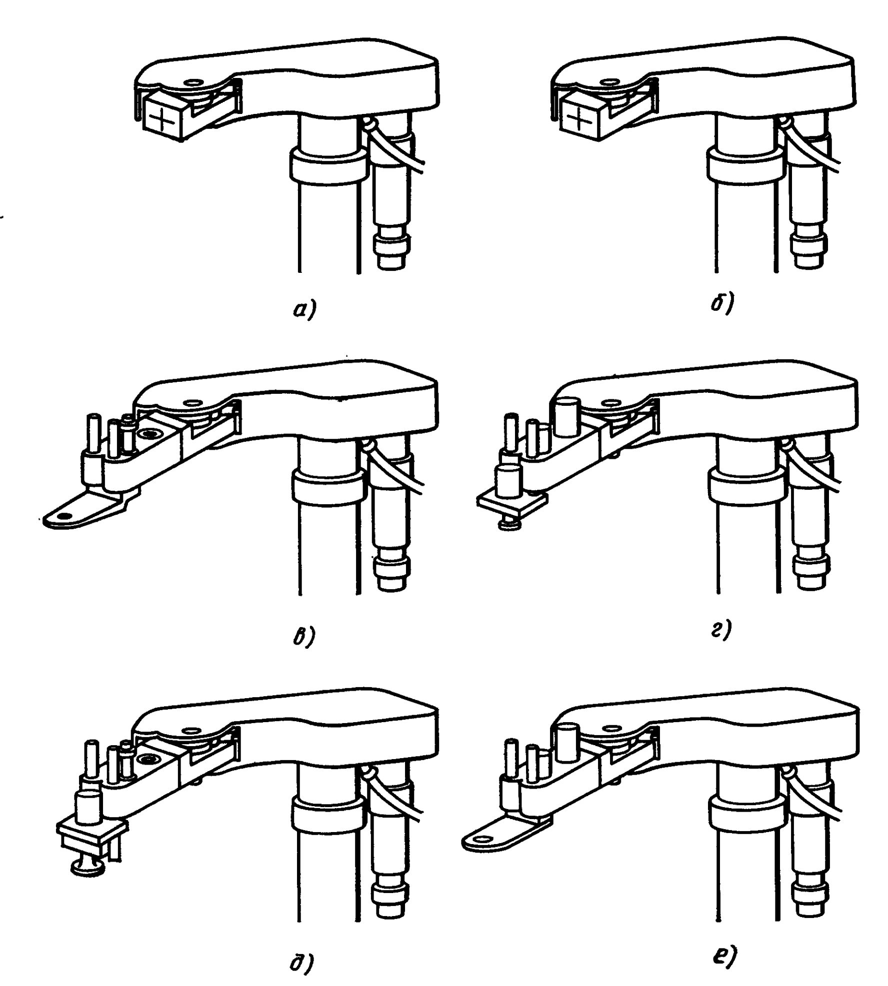


Рис. 27.2. Пять вариантов построения модульного робота с электромеханическим приводом:
а — базовая конструкция; *б* — конструкция с двумя степенями подвижности (для автоматических гайковертов, паяльных машин, сварочных головок, устройств нанесения герметика); *в* — конструкция с двумя степенями подвижности и перемещением по вертикали с помощью пневмоцилиндра (для выполнения простых операций подачи или установки круглых деталей); *г* — конструкция с четырьмя степенями подвижности (для выполнения сложных сборочных операций); *д* — конструкция с двумя степенями подвижности, перемещением по вертикали с помощью пневмоцилиндра и вращающимся запястьем (применяется в случаях, когда ориентация изделия меняется); *е* — конструкция с тремя степенями подвижности и сервоуправляемым перемещением по вертикали (с разрешения фирмы «Хирата»)

Линейный модуль основания 800, диапазон перемещений 0,6–10 м

Линейный модуль основания мод. 350, диапазон перемещений 0,6–10 м

Линейный подвесной модуль, 1,2 или 3 степени подвижности

Модуль вращающегося основания, вращение на 240°

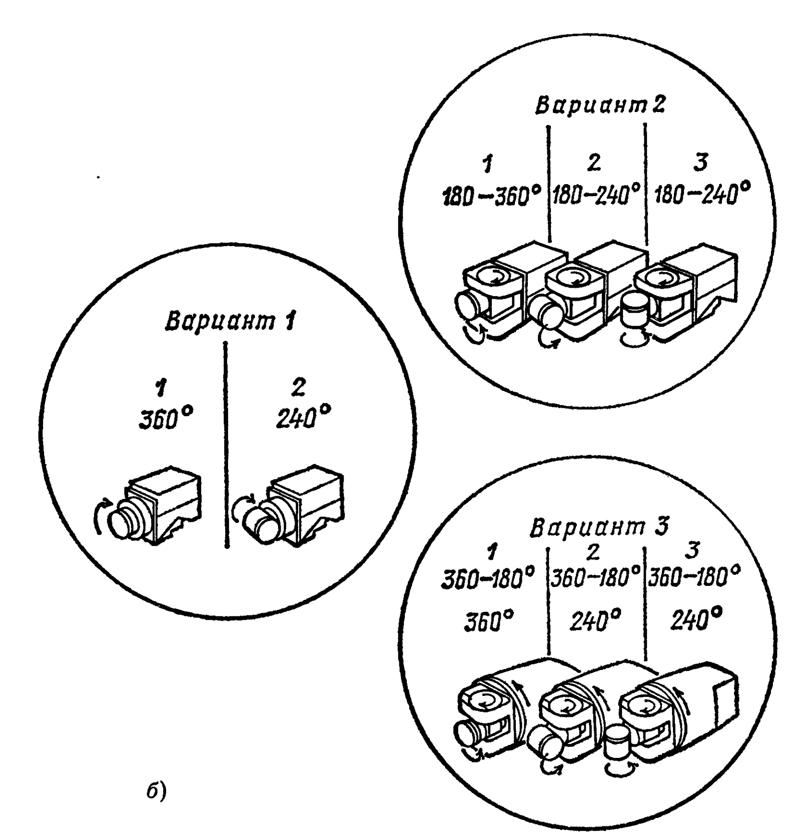
Качающийся модуль, диапазон отклонения 60°

Модуль вертикального перемещения, диапазон перемещений 0,7–1,2 м

Линейный модуль со скользящей кареткой, диапазон перемещений до 1,2 м, возможна любая ориентация

Линейный модуль модули 180, диапазон перемещения 0,3 м

а)



б)

Рис. 27.3. Возможные сочетания базовых модулей фирмы «Циаки»:
а — модули манипулятора; *б* — модули запястья (присоединяются к любому модулю)

вижности, грузоподъемность до 10 кг (при пневмоприводе захвата) и, как правило, высокую точность повторного позиционирования — 0,005 мм (при использовании внешних механических стопоров).

27.3. Применение модульных роботов

Модульные роботы применяются достаточно широко, в основном там, где требуется цикловое управление. На рис. 27.5 приведены три примера использования роботов с пневмо- и гидроприводами. В каждом случае подбор модулей определялся конкретным назначением робота, поэтому в его конструкцию не закладывались избыточные возможности.

27.3.1. Применение модульных роботов для сборки

Возможность использования роботов для программируемой сборки вызвала большой интерес (см. ч. 11). Эта область применения модульных роботов описана в [2] и [4] (рис. 27.6). С другой стороны, быстро развиваются так называемые сборочные модули [3]. Это стандартные модульные сборочные агрегаты, обладающие широким спектром возможностей. Использование таких модулей оправдано при объеме выпуска от 500 тыс. до 1 млн. изделий в год. Райли [3] предложил метод оценки модульной системы по следующим четырем ключевым пунктам.

Не достигнута ли модульность ценой снижения прочности?

Позволяет ли модульность системы приспосабливать ее к изменениям выпускаемой продукции без серьезного нарушения графика работы?

Насколько оборудование системы будет пригодно в случае значительного изменения выпускаемой продукции?

Возможно ли успешное проведение технического обслуживания модульной системы персоналом средней квалификации?

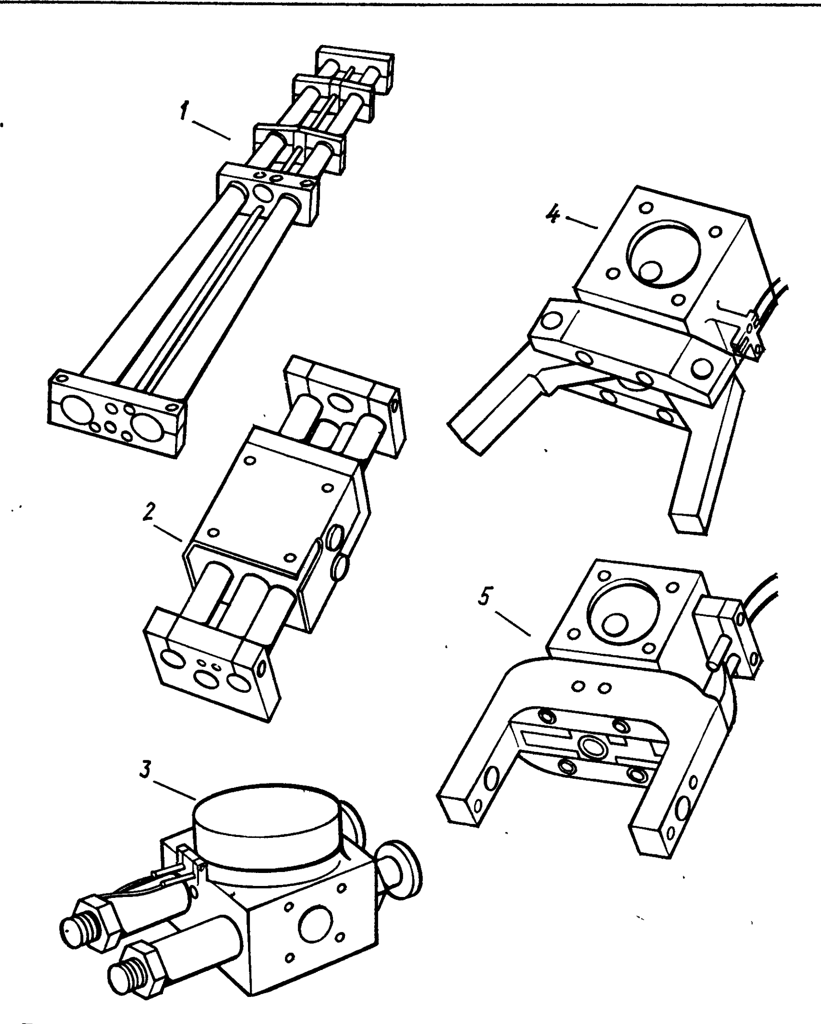


Рис. 27.4. Пневматические и гидравлические модули, работающие с программными устройствами управления:

1 — линейный с большим диапазоном перемещения; *2* — линейный с малым диапазоном перемещения; *3* — вращательный; *4* — захват с угловым перемещением пальцев; *5* — захват с поступательным перемещением пальцев (с разрешения фирмы «Фибро манта»)

Ответы на эти вопросы помогут пользователю еще до внедрения модульной системы оценить эффективность ее использования.

27.3.2. Применение модульных роботов для точечной сварки

Как правило, чтобы достичь любой задаваемой точки, манипулятор универсального робота должен иметь 5 или 6 степеней подвижности. Однако на практике существуют и такие области применения, где не требуется 6 степеней подвижности, и такие, где 6 степеней подвижности недостаточно. Если позволяют геометрия детали и диапазон целевых положений рабочего органа, может быть необходимо использовать (и соответственно программировать) движение лишь по одной или двум осям. При этом возможность движения по остальным осям остается неиспользованной, избыточной. Как правило, выгодно разделять устройства, реализующие перемещения манипулятора по различным осям. Такое разделение позволяет использовать в каждом конкретном случае только те устройства,

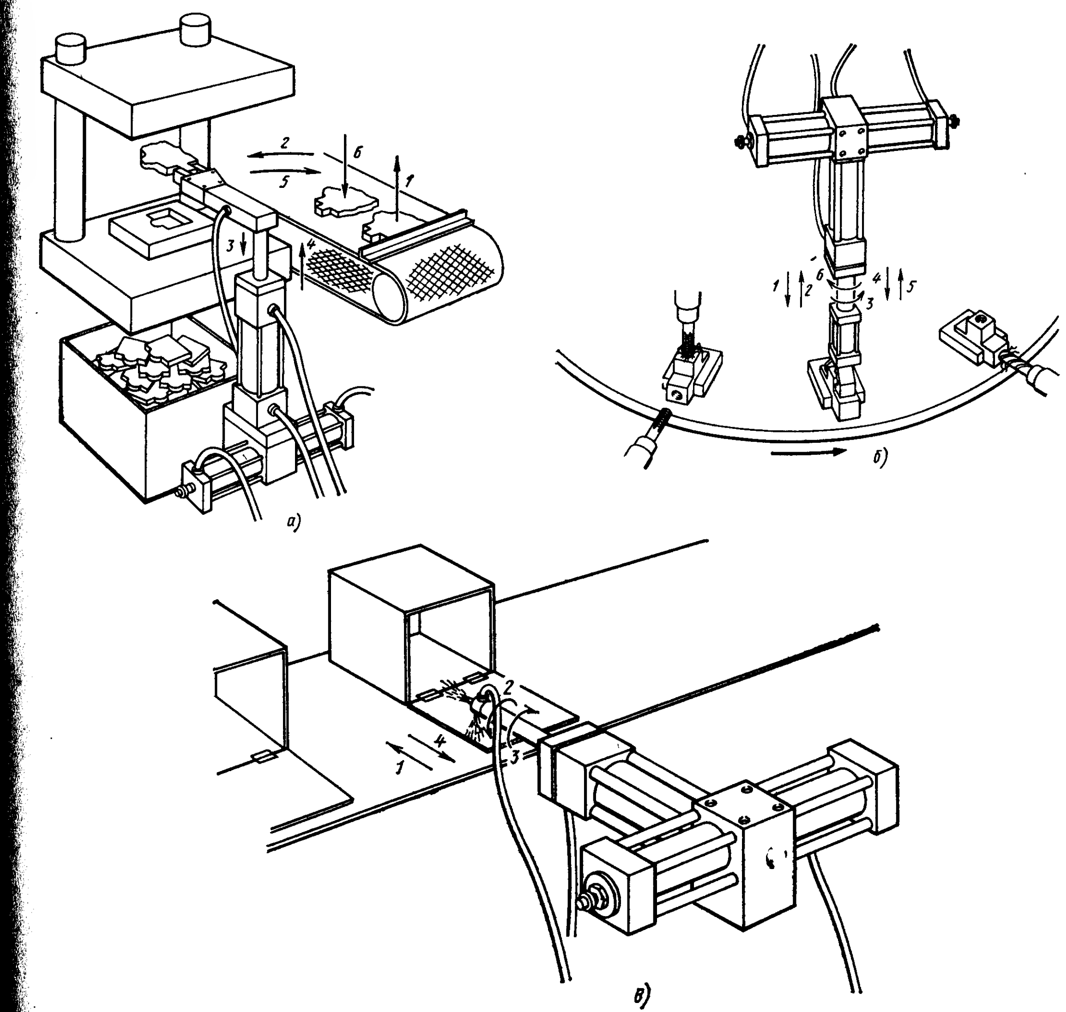
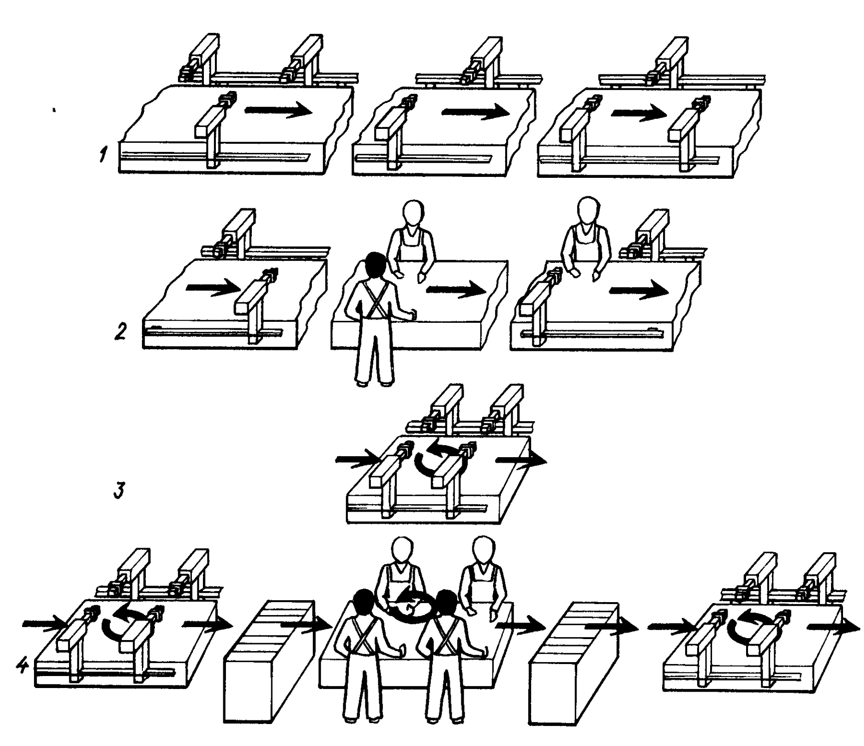


Рис. 27.5. Примеры использования модульных устройств с пневмо- и гидроприводами:

а — загрузка пресса. Совершающий одновременно несколько движений манипулятор, снабженный захватом с пневмоприводом, загружает автоматический обрезной пресс. После того как захват зажал стояк отливки, поршень привода выдвигается вверх, поворачивает захват к прессу и отливка оказывается над матрицей. Затем поршень втягивается, опуская отливку на матрицу. Захват разжимается, поршень выдвигается, поворачивается и опускается в положение для захватывания следующей детали. (На рисунке опущены дополнительные опоры штока поршня.) В зависимости от величины нагрузки могут потребоваться ограничители вращательных перемещений;

б — переворачивание деталей. Отпадает необходимость в операторе для снимания и поворачивания деталей в процессе механообработки поверхностей, доступ к которым невозможен при исходном положении детали. Сначала нарезание внутренней резьбы выполняется в верхнем и одном боковом элементе детали Т-образной конфигурации. Затем деталь необходимо развернуть на 180°, чтобы просверлить отверстие и нарезать резьбу в другом боковом элементе. Порядок выполнения операции следующий. Захват опускается к детали. Пальцы, приводимые в действие пневмоцилиндром, захватывают деталь, освобожденную из зажимного приспособления. Запястье поднимается и разворачивается на 180°, затем опускается и помещает деталь в зажимное приспособление. После фиксации детали пальцы захвата разжимаются и выпускают деталь, запястье поднимается и поворачивается в исходное положение;

в — окраска распылением. Выполняется окраска внутренних поверхностей контейнера, крышка которого находится в откинутом положении. Линейное звено манипулятора выдвигается и производится окраска крышки и одной стенки контейнера, затем линейное звено поворачивается и выполняется обработка остальных трех стенок и дна. Подача краски прекращается, запястье возвращается в исходное положение, совершая одновременно возвратное и вращательное движения (с разрешения фирмы «Пн-Эйч-Дн»)



ис. 27.6. Различные конфигурации рабочих ячеек на базе модульного сборочного робота Аллегро»:

– автоматическая линия; 2 — полуавтоматическая линия; 3 — автоматизированная ячейка; 4 — сочета-е неавтоматизированной и автоматизированной ячеек (с разрешения фирмы «Дженерал электрик»)

ойтись без которых невозможно. Это дно на примере оборудования для точечй сварки изделий из металлических лиов: заготовительных и вспомогательных орочных ячеек, ячеек формообразования предварительной сварки, а также ячеек ончательной сварки. Использование принпов модульности при обеспечении перещений сварочной головки имеет много еимуществ: уменьшаются количество и ожность оборудования, облегчается его хническое обслуживание, экономятся позная площадь и капиталовложения, при ом повышаются гибкость и удобство penаладки, упрощается запуск в производво новых изделий. В систему, построеню по принципу модульного задания двиний по осям, могут входить линейные и ащательные базовые модули, комбинация промежуточных модулей манипулятора модулей запястья, обеспечивающих врание по одной, двум или трем осям. На с. 27.7 показан способ компоновки унисального робота с шестью степенями движности из модулей, представленных рис. 27.3. На рис. 27.8 показаны некоторые сочетания модулей, удобные для выполнения точечной сварки при числе степеней подвижности менее шести. Часто для выполнения точечной сварки по прямой линии требуется перемещение только по одной оси. В таких случаях может использоваться программируемый модуль-каретка (рис. 27.9), выполняющий заданное перемещение сварочной головки или детали по горизонтальной, вертикальной или наклонной траектории. На каретке устанавливается модуль запястья с необходимым числом степеней подвижности. Предельная нагрузка модуля-каретки рассчитывается так же, как для робота с большим числом степеней подвижности.

27.3.3. Выбор конфигурации модульного робота

Кроме уже рассмотренных соображений выбор кинематической схемы определяется условиями работы и геометрией рабочего пространства. Принцип модульности обеспечивает выбор наилучшей компоновки ро-

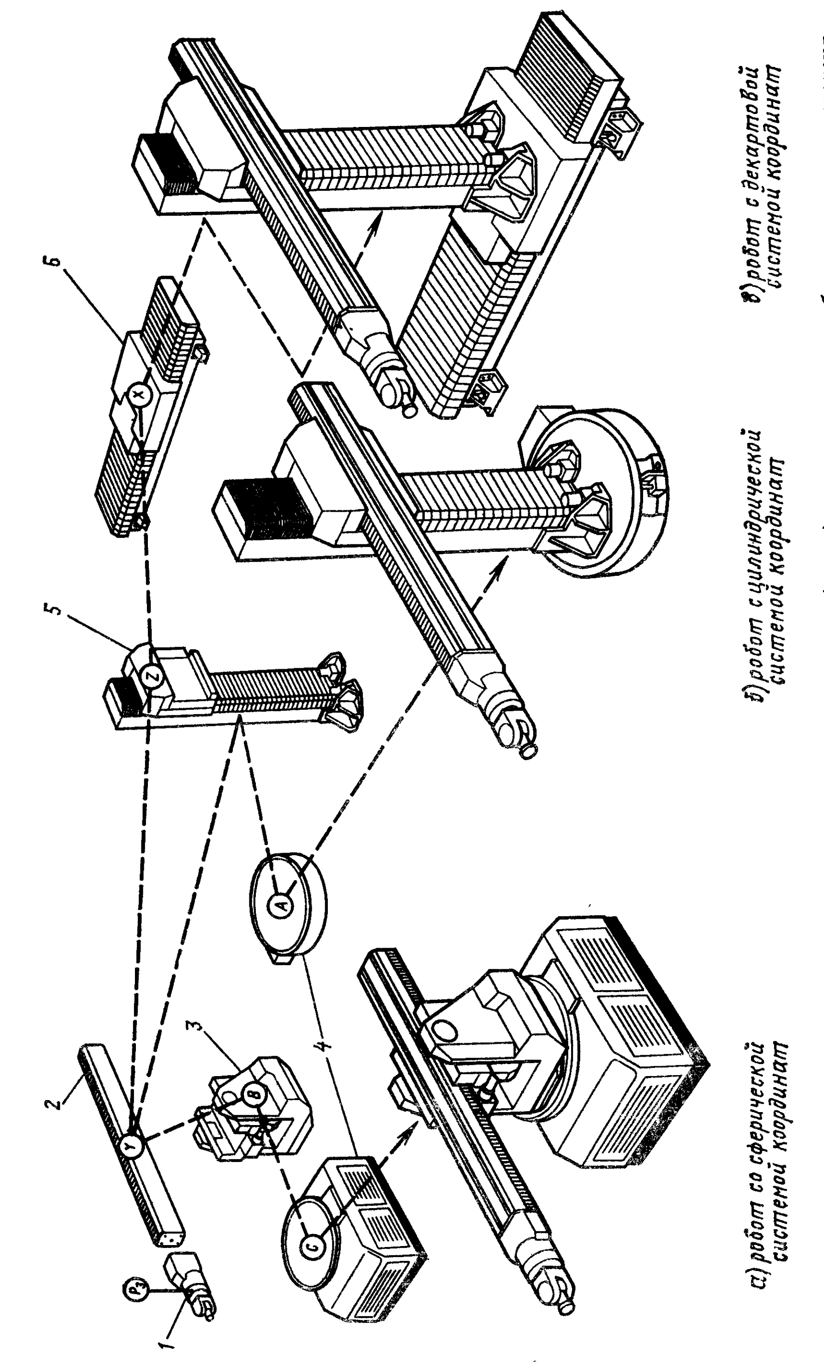


Рис. 27.7. Способ модульной компоновки трех различных типов (а — в) универсальных роботов с шестью степенями подвижности:

1 — модуль запястья с 3 степенями подвижности; 2 — модуль со скользящей кареткой; 3 — качающийся модуль; 4 — модуль вращающегося основания; 5 — модуль вертикального перемещения; 6 — линейный модуль основания

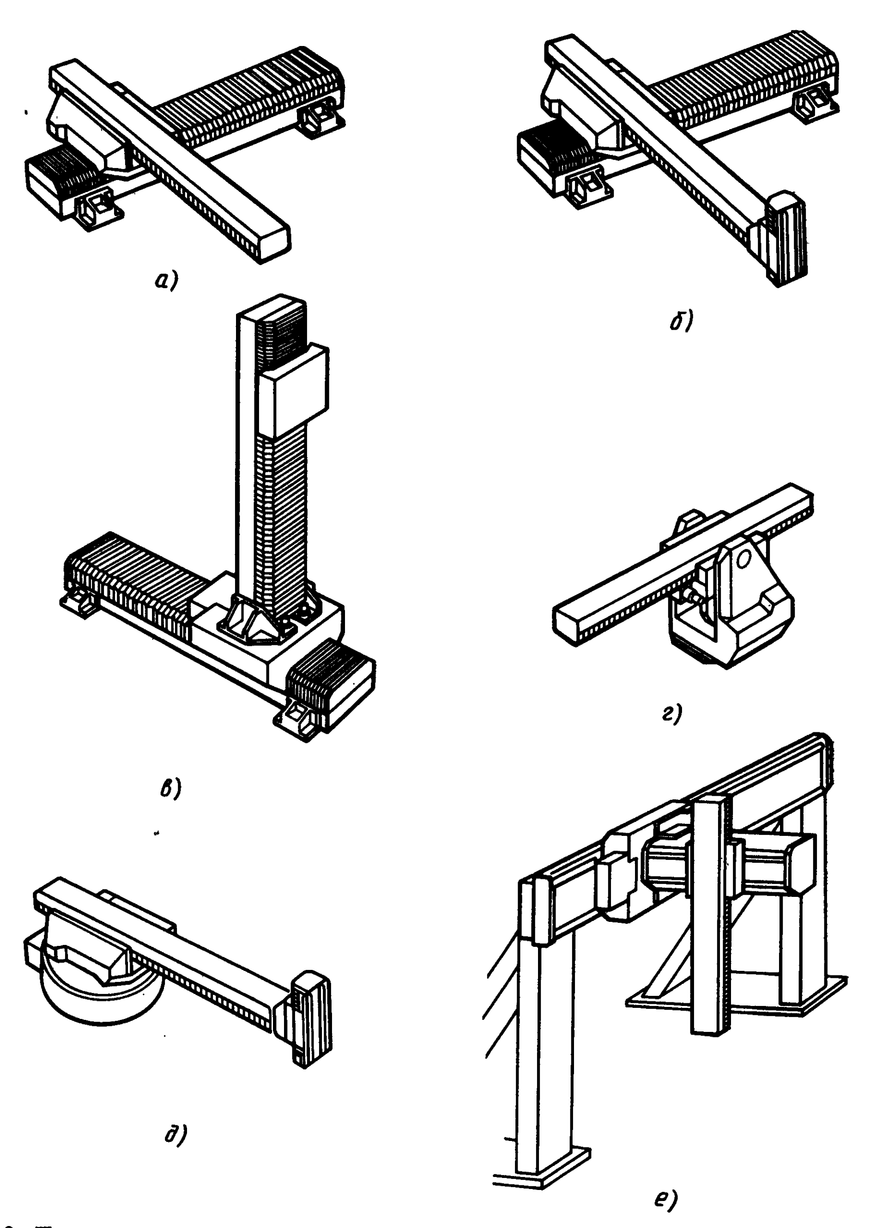
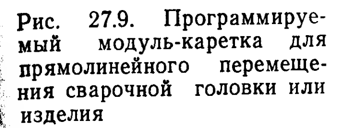
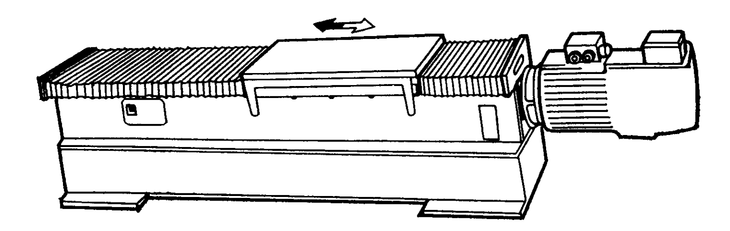


Рис. 27.8. Примеры модульных роботов с числом степеней подвижности менее шести (без модулей запястья):

а — 2 степени подвижности, горизонтальная декартова система координат; *б* — 3 степени подвижности, декартова система координат; *в* — 2 степени подвижности, вертикальная декартова система координат; *г* — 3 степени подвижности, цилиндрическая система координат; *д* — 2 степени подвижности, полярная система координат; *е* — 3 степени подвижности, декартова система координат, портальное исполнение


Рис. 27.9. Программируемый модуль-каретка для прямолинейного перемещения сварочной головки или изделия



бота. Ниже рассмотрены примеры выбора конструкции робота.

Предварительная сварка кузова. Места точечной сварки расположены по всему кузову автомобиля — по обеим сторонам, спереди и сзади. Обычно для ее выполнения нужны шесть роботов: два по бокам и по одному спереди и сзади (рис. 27.10). Для сварки боковых частей кузова (см. кн. 2, гл. 44) идеально подходят роботы с декартовой системой координат. Поскольку для обработки передней и задней частей кузова роботы должны опускаться сверху, предпочтительно использовать устанавливаемые тельферно гидравлические роботы с ангулярной системой координат. С их помощью можно сваривать даже днище кузова.

Сварка боковых сторон или нижней части кузова. Точечная сварка внутренних поверхностей может проводиться через большие проемы в кузове. Для этого удобнее всего роботы с декартовой системой координат (такие, как робот, изображенный на рис. 27.11).

Сварка днища кузова. Для выполнения этой операции нужны массивные сварочные головки, обеспечивающие большую толщину шва. Выбор модульных роботов с декартовой системой координат (рис. 27.12) дает возможность сократить кинематическую цепь, увеличивая предельную нагрузку и точность робота. Роботы, установленные на арке (портале) (рис. 27.13), могут сваривать точки, симметрично расположенные по обеим сторонам кузова. Для повышения технологической гибкости могут применяться дополнительные поворотные модули (рис. 27.14).

Сварка в вертикальном направлении. В случае, показанном на рис. 27.15, роботы, устанавливаемые на арках, не го-

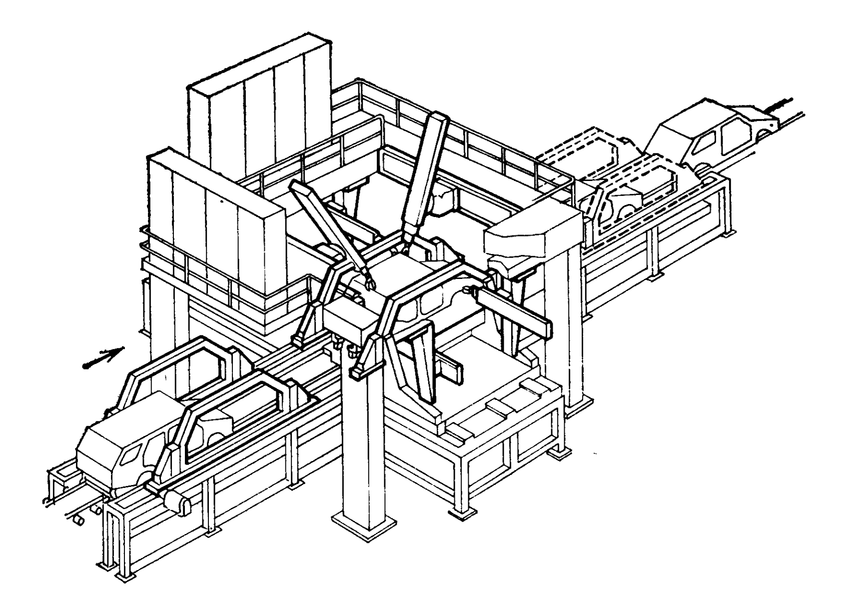


Рис. 27.10. Ячейка формообразования и предварительной сварки кузовов пяти различных моделей

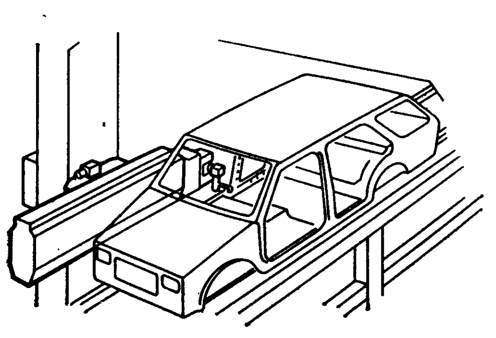


Рис. 27.11. Сварка нижней кромки кузова в плоскости, параллельной направлению перемещения поточной линии

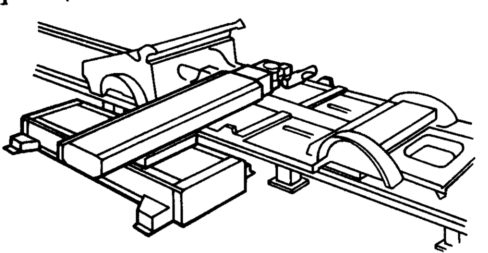


Рис. 27.12. Робот для сборки днища кузова (декартова система координат, 2 степени подвижности, модуль запястья с 2 степенями подвижности)

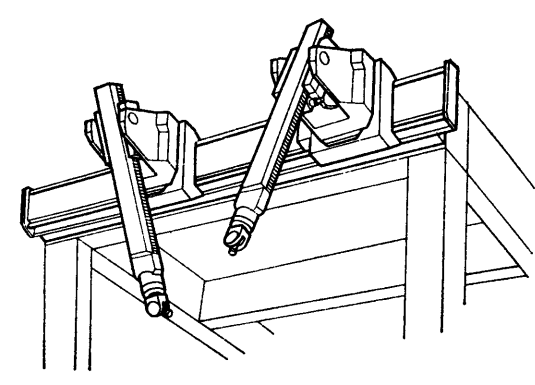


Рис. 27.14. Тельферные роботы с цилиндрической системой координат для сварки днища

дятся, поскольку необходимо обеспечить доступ к точкам, расположенным по бокам и снизу кузова. Поэтому лучше устанавливать робот сбоку. На рис. 27.15 изображен робот, конструкция которого обеспечивает 3 необходимые степени подвижности за счет установки линейного вертикального модуля в сочетании с горизонтально-поворотным модулем на горизонтальном базовом модуле.

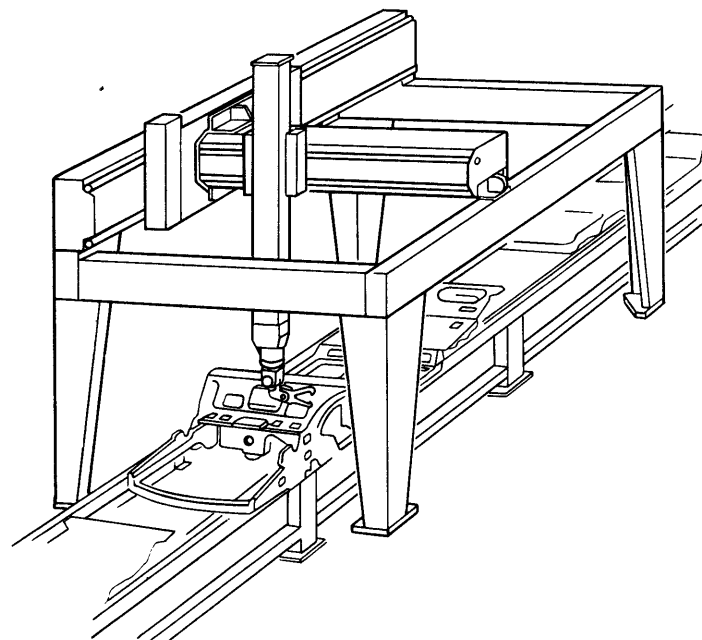
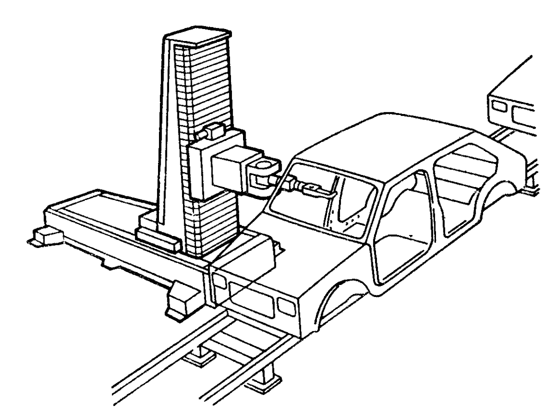


Рис. 27.13. Сборка днища с помощью установленного на портале робота с декартовой системой координат и тремя степенями подвижности

Рис. 27.15. Сварка в плоскости, перпендикулярной к перемещению конвейера



27.4. Заключение

В настоящее время всего около 5 % выпускаемых роботов — модульные. Однако, как уже говорилось, существуют серьезные основания для расширенного использования принципа модульности при разработке и компоновке роботов. Предполагается, что накопление опыта эксплуатации и усовершенствование конструкций модулей приведет к разработке и успешному внедрению новых семейств модульных роботов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Surnin, B. N., Design features of modular type robots, *Machines and Tooling*, Vol. 49, No. 7, 1978, pp. 13—16.
2. Drexel, P., Modular, flexible assembly system "FMS" from Rosch, *Proceedings of the 3rd Assembly Automation Conference*, Stuttgart, West Germany, May 1982, pp. 104—154.
3. Riley, F. T., The use of modular, flexible assembly systems as a half-way path between special design and robots, *Proceedings of the 3rd Assembly Automation Conference*, Stuttgart, West Germany, May 1982, pp. 445—452.
4. Romeo, G., and Camera, A., Robots for flexible assembly systems, *Robotics Today*, Fall 1980.
5. Stauffer, R. N., The Fibro/Manca part handling system, *Robotics Today*, Fall 1979.

Глава 28.

РАБОЧИЕ ОРГАНЫ РОБОТОВ

Р. Д. Поттер, фирма «Робот системз», г. Норкросс, шт. Джорджия, США

28.1. Введение

С помощью рабочего органа робот может поднимать и переносить детали и (или) удерживать разнообразные инструменты для обработки деталей. Для загрузки и разгрузки станков и агрегатов (например, кузнечных прессов, машин для литья под давлением и в постоянные формы) роботы снабжаются захватами. Для обработки деталей роботы оснащаются головками для точечной сварки, сверлами, фрезами, шлифовальными, режущими и другими инструментами, а для изготовления и формовки деталей — горелками для дуговой сварки, ковшами для разливки расплавленного металла и др. Рабочий орган робота может быть снабжен инструментами для сборки (автоматические отвертки, гайковерты) и отделки изделий (краскораспылительные головки), а также специальными контрольно-измерительными устройствами (линейные дифференциальные трансформаторы, лазерные приборы и т. д.). Ограничений на тип рабочего органа и его устройство практически не существует, поскольку в отличие от человеческой руки, он может иметь любую форму, удобную для выполнения конкретной работы.

Рабочий орган — важная часть роботизированной системы, то звено, через которое робот взаимодействует с изделием. Успех или неудача использования робота во многом зависит от того, насколько хорошо продуман, сконструирован и изготовлен его рабочий орган. В большинстве случаев он проектируется в соответствии с требованиями конкретного технологического процесса. Хотя определяющими при этом являются деталь и технология ее обработки, нельзя забывать и о других элементах роботизированной системы. Поэто-

у на стадии разработки необходимо учесть взаимосвязь всех элементов системы с деталью и технологическим процессом. Поскольку вариантов оснастки существует даже больше, чем типов технологий и оборудования, очень сложно обобщить или попытаться заключить в какие-то рамки творческий процесс ее разработки. Однако для создания оптимальной роботизированной системы при разработке рабочего органа необходим системный подход: ни один критический фактор не должен быть упущен.

28.2. Системный подход к разработке рабочего органа

Разработка рабочего органа для конкретного приложения представляет собой определенный этап последовательной разработки роботизированной системы. Последовательность в выполнении всех работ обеспечивает максимальную производительность и эффективность проектируемой системы. При разработке роботизированной системы и рабочего органа следует руководствоваться следующими основными правилами.

Не следует пытаться имитировать действия человека, выполняющего операции. Хотя человек имеет значительно более совершенные средства восприятия (зрение, слух, осязание и т. д.), робот свободен от физических ограничений, присущих человеку в других областях. Робот, не имея руки с пятью пальцами, может гораздо дольше человека удерживать значительно более тяжелые грузы и при более неблагоприятных внешних условиях. Поэтому не стоит ограничивать возможности роботизированной системы, пытаясь копировать возможности человека.

Не следует сначала выбирать робот, а затем пытаться оснастить его необходимым рабочим органом; выбор робота, наиболее подходящего для конкретного приложения, составляет один из этапов разработки системы. Разработка роботизированной системы проводится в следующей последовательности (на рис. 28.1 схематично представлены все этапы работы).

а. Необходимо внимательно изучить технологический процесс. Возможно, его роботизация потребует применения отличных от традиционных приемов. При этом могут повыситься эффективность и качество работы.

б. Необходимо провести анализ всего используемого в технологическом процессе оборудования. Возможно, его следует доработать в соответствии с новыми требованиями. Например, придется предусмотреть приспособления для автоматического захватывания и датчики сбоев, убрать защитные ограждения, обеспечить связь с устройствами управления для автоматического запуска-останова, смены инструмента, перемещения транспортера и регулировки зазоров.



Рис. 28.1. Системный подход к разработке оснастки

в. Необходимо определить, какие датчики и вспомогательное оборудование войдут в автоматическую систему. Датчики обеспечивают интеграцию всех элементов системы, включая и рабочий орган робота. Следует определить все подлежащие контролю параметры системы, и предусмотреть соответствующие датчики. Не стоит пытаться выполнить все операции одним роботом. Разумнее разделить работу между роботом и вспомогательным оборудованием (устройствами для ориентирования деталей, зажимными приспособлениями, транспортерами, контрольно-измерительными приборами) и попытаться организовать одновременное выполнение нескольких операций. Это упростит рабочий орган и сократит технологический цикл. После того как проведено разделение функций между роботом и вспомогательным оборудованием и сформулированы требования к датчикам, необходимо определить требования к рабочему органу.

г. Необходимо сформулировать общую концепцию рабочего органа. На этом этапе еще не известны тип и модель робота.

д. Следует определить устройство управления. Как правило, кроме устройства управления роботом в систему входят устройства управления работой периферийного оборудования и последовательностью выполняемых действий. При выборе подходящего устройства необходимо учитывать максимально возможное количество шагов в программе, число программ, возможность их замены и т. д.

е. Необходимо выбрать тип и модель робота. При выборе рассматриваются следующие характеристики: режим управления (цикловой без сервоуправления, цикловой с сервоуправлением, контурный с сервоуправлением); размеры и конфигурация рабочего пространства; грузоподъемность (с учетом массы оснастки); длительность цикла; точность повторного позиционирования; тип привода (пневматический, гидравлический или электрический); программные и аппаратные возможности робота. Следует учесть и такие факторы, как стоимость, надежность и простота обслуживания.

ж. Необходимо окончательно сформулировать концепцию рабочего органа и выполнить предварительную разработку его конструкции с учетом выбранного робота, периферийного оборудования и других элементов системы. Конструкция присоединительного фланца робота, размеры и конфигурация его рабочего пространства также могут повлиять на выбор конструкции рабочего органа.

В соответствии с приведенной последовательностью работ разработка общей концепции и проектирование рабочего органа проводятся только после соответствующего анализа изменений, вносимых в технологический процесс и производственное оборудование, составления требований к датчикам и периферийному оборудованию и выбора робота.

28.3. Определение рабочего органа

Рабочий орган — это часть производственной роботизированной системы, связывающая механическую часть робота (манипулятор) с удерживаемой или обрабатываемой деталью. Основная часть промышленного робота — его механическая «рука» с плоским фланцем для присоединения инструмента, который может быть перемещен в любую точку рабочего пространства. Оснастка (в виде рабочих органов для захвата деталей или удержания обрабатывающих инструментов) прикрепляется к присоединительному фланцу робота, обеспечивая связь робота с изделием.

28.4. Элементы рабочего органа

Обычно рабочий орган состоит из четырех элементов (рис. 28.2), обеспечивающих прикрепление захвата или инструмента к присоединительному фланцу робота, подачу энергии для приведения в действие инструмента, механические соединения и очувствление рабочего органа.

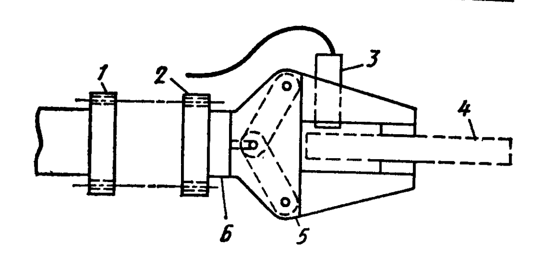


Рис. 28.2. Элементы рабочего органа:

1 — присоединительный фланец робота; *2* — присоединительный фланец рабочего органа; *3* — датчик; *4* — удерживаемая деталь; *5* — механическая часть; *6* — привод (пневмоцилиндр)

Присоединительный фланец. Присоединительный фланец, расположенный на конце последнего звена манипулятора робота, служит для присоединения рабочего органа к промышленному роботу. Для прикрепления служат отверстия во фланце, резьбовые или с нормированным допуском. Для неподвижного закрепления захвата или инструмента может использоваться переходный фланец с таким же рисунком отверстий, как и на присоединительном фланце робота. С его помощью захват или инструмент монтируется на поверхности, расположенной на нужном расстоянии от присоединительного фланца робота и имеющей другую ориентацию в пространстве. Если выполняемые роботом действия требуют автоматической смены захватов или инструментов, то может быть использовано присоединительное устройство. В этом случае на используемых захватах или инструментах устанавливаются переходные фланцы, приспособленные для фиксации в присоединительном устройстве. В присоединительном устройстве может предусматриваться подвод энергии, используемой приводом рабочего органа. В этом случае подача энергоносителя включается автоматически, сразу после захвата рабочего органа присоединительным устройством. Эту задачу можно решить иначе: каждый инструмент может быть постоянно подсоединен к своей цепи питания, и роботу остается только захватывать различные инструменты, присоединенные к переходным фланцам, согласованным с присоединительным устройством.

Привод. Оснастка может иметь гидро-, пневмо- или электромеханический привод или не иметь его (например, крюки или ковши). Обычно везде, где это возможно, используются пневматические приводы, так как их легко обслуживать, они сравнительно мало весят и недороги. Там, где от рабочего органа требуется значительная мощность, применяются гидравлические приводы. Однако возможность загрязнения деталей подтекающей рабочей жидкостью

ограничивает использование гидравлических устройств в качестве привода рабочего органа. Электромеханические приводы, несмотря на меньший шум при работе, применяются реже, поскольку развивают меньшую мощность. Электрические приводы используются в малых сборочных роботах, там, где нагрузки невелики — ими легче управлять. При выборе рабочего органа необходимо учитывать тип источника энергии робота. У некоторых роботов, особенно предназначенных для переноски деталей, предусмотрено отдельное питание рабочего органа.

Механические соединения. В конструкции рабочего органа может быть предусмотрено непосредственное воздействие привода на деталь (например, пневматический цилиндр обеспечивает перемещение сверла в глубь детали) или использованы механизмы, дающие преимущество в силе или расстоянии (например, захваты шарнирного типа). В конструкции захвата может быть предусмотрена возможность замены пальцев в зависимости от размеров и конфигурации детали. В свою очередь, пальцы могут иметь сменные накладки, соответствующие деталям различной формы.

Датчики. Датчики вводятся в состав рабочего органа с различными целями. Датчики, следящие за тем, чтобы во время выполнения операции робот удерживал обрабатываемую деталь или инструмент, предусматриваются для обеспечения безопасности. Датчики встраиваются в оснастку и для контроля состояния детали или инструмента во время выполнения операции. Например, силомоментный датчик, соединенный со сверлом, определяет, не притупились ли его режущие кромки. Датчики используются и для контроля завершения технологического процесса (например, датчики подачи электрода в горелках для дуговой сварки и расходомеры в диспенсерах). Иногда рабочие органы специальных сборочных роботов снабжаются тензодатчиками и дальномерами.

28.5. Типы рабочих органов

Существует два класса рабочих органов робота: захваты для удержания деталей и инструменты для обработки деталей. Разработка захватов для загрузки станков, сборки и перемещения деталей представляет значительно бо́льшую сложность, чем проектирование захватов для удержания инструмента. Сконструировать специализированный захват сложнее, чем разработать способ закрепления инструмента на конце манипулятора робота.

Ниже описаны пять основных типов рабочих органов (как захватов, так и инструментов).

28.5.1. Присоединительные устройства

Эти устройства представляют собой фланцы с кронштейнами для прикрепления инструмента к присоединительному фланцу робота. Иногда присоединительные устройства служат для закрепления обрабатываемой детали, например, при выполнении операций с довольно большой продолжительностью цикла, требующих перемещения детали относительно неподвижного инструмента. В этом случае деталь закрепляется и снимается вручную.

28.5.2. Приспособления для подъема и транспортировки

Типичные примеры рабочих органов этого типа — вилочные подъемники (рис. 28.3), крюки, ковши и черпаки. Они не нуждаются в приводе, робот просто подводит приспособление под требуемую деталь, поднимает деталь или инструмент и переносит в заданное место.

28.5.3. Пневматические захваты

Самый распространенный пример оснастки данного типа — это вакуумный захват (рис. 28.4). Захватывание транспортируемых деталей осуществляется за счет разрежения, создаваемого эжектором или вакуумным насосом. Вакуумные присосы обычно используются для деталей с гладкой поверхностью в довольно широком диапазоне размеров, конфигураций и материалов. С помощью вакуумных систем

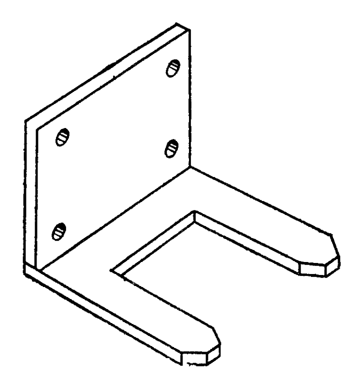


Рис. 28.3. Приспособление для подъема и транспортировки

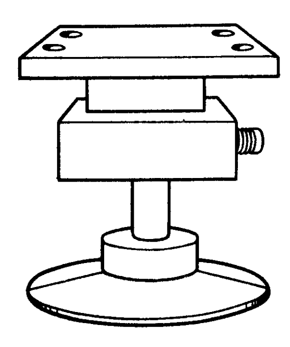


Рис. 28.4. Вакуумный захват

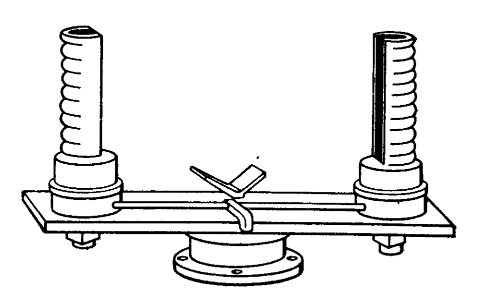


Рис. 28.5. Пневматический захват с надувными пальцами

можно поднимать и детали с негладкой поверхностью. Для этого к поверхности захвата прикрепляется кольцо из пенорезины, имеющее форму поверхности детали и обеспечивающее герметичность, достаточную для вакуумной транспортировки. Вакуумные эжекторы сравнительно недороги и используются для удержания легких деталей, не требующих большого разрежения. Вакуумные насосы, более бесшумные и дорогие, создают значительное разрежение и могут использоваться для транспортировки тяжелых деталей. При использовании любой вакуумной системы важно состояние детали. Замасленные или мокрые детали могут выскальзывать из захватов, и, чтобы избежать этого, используются дополнительные приспособления, ограничивающие перемещение захваченной детали. В некоторых случаях могут использоваться захваты, не имеющие пневмопривода: необходимое для поднятия детали разрежение создается прижиманием захвата к детали, приводящим к удалению воздуха из пространства между ними. Однако освобождение детали из такого захвата требует применения съемных приспособлений. При использовании эжекторов или вакуумных насосов отделение детали от захвата может производиться за счет впускания воздуха. Вакуумные захваты работают в ограниченном интервале температур и не могут применяться для захватывания горячих деталей.

Другой пример пневматического захватного приспособления — надувной баллон. Обычно это специально разрабатываемые приспособления, предназначенные для работы с деталями определенной формы. Баллон, из которого с помощью вакуумной системы откачан воздух, вводится в полость детали или охватывает ее наружную поверхность. После этого в баллон нагнетается сжатый воздух, и раздувание рифленой поверхности приводит к тому, что гладкая поверхность плотно обхватывает деталь. Благодаря такому обхватыванию наружной поверхности детали приспособлению для захвата достаточно двух пальцев (рис. 28.5). Эти приспособления также подходят для деталей различной конфигурации и к тому же не требуется вакуумного устройства для их возврата в исходное состояние.

28.5.4. Магнитные захваты

Эти устройства могут использоваться для удержания деталей, содержащих железо. В них могут применяться постоянные и электрические магниты. Использование постоянных магнитов требует приспособления для съема детали, для отделения ее от магнита. Обычно магниты имеют плоскую поверхность соприкосновения с деталью, но могут снабжаться и переходными пластинами, повторяющими контур детали. Последняя новинка в этой области — электромагнит, снабженный эластичным баллоном с железными опилками, который принимает форму поверхности захватываемой детали. Как и в случае вакуумных захватов, замасливание или увлажнение поверхности детали может привести к соскальзыванию ее с магнита при транспортировке. Поэтому необходимо предусмотреть дополнительные ограничители. При использовании магнитов следует принять во внимание еще три момента. Если робот применяется для операций металлообработки, то к магниту могут прилипать стружки. Поэтому его требуется периодически очищать. Необходимо также учесть возможность намагничивания детали в процессе ее захватывания и транспортировки магнитными приспособлениями. Если это намагничивание готовой детали нежелательно, то приходится выполнять ее размагничивание. При использовании электромагнита отказ в цепи питания приведет к немедленному выпаданию детали из захвата, что создаст аварийную ситуацию. Поэтому хотя электромагнитные захваты проще в управлении

и быстрее захватывают и отпускают деталь, в опасных условиях, где необходимо взрывобезопасное оборудование, следует использовать постоянные магниты. Обычные магниты работают при температуре до 60 °С, но могут быть разработаны и магниты, рассчитанные на температуру до 150 °С.

28.5.5. Механические захваты

Другой тип рабочих органов — механические захваты. Они широко используются при выполнении операций, связанных с перемещением деталей. Требуемое усилие создается за счет пневмо-, гидро- или электропривода и передается детали через передаточные механизмы и пальцы захвата. Для обеспечения сжимания пальцев захвата чаще всего используется пневмоцилиндр, диаметр и длина которого подбираются в зависимости от того, какое требуется давление сжатого воздуха для создания оптимального усилия сжатия. Усилие сжатия можно регулировать изменением давления в приводах рабочего органа. Уменьшить силу сжатия можно, используя мягкие эластичные накладки, прикрепляемые в местах контакта пальцев с деталью. Современные модели серийных роботов, наряду со встроенными средствами контроля размеров, снабжены датчиками и средствами управления усилием сжатия. Пальцы захватов таких роботов сжимают деталь любого размера до тех пор, пока усилие сжатия не достигнет заданного значения. Пальцы других стандартных захватов имеют встроенные тензодатчики, определяющие положение деталей относительно захвата для соответствующей коррекции движения манипулятора робота.

Движения пальцев механических захватов могут быть различными и их выбор зависит от удобства захватывания и высвобождения конкретной детали. Самые простые движения выполняются захватом, имеющим один неподвижный (зафиксированный) и один подвижный палец (рис. 28.6). Действует он следующим образом: робот подводит захват к детали, и подвижный палец прижимает ее к фиксированному. При этом необходимо, чтобы деталь не была закреплена и вокруг нее было достаточно свободного места. Если же деталь плотно зажата, то использование захвата данной конструкции нецелесообразно. Можно добиться центровки и точного расположения детали в процессе захватывания, если снабдить пальцы такого захвата V-образными накладками.

1 2 2 3

Рис. 28.6. Захват с одним неподвижным и одним подвижным пальцами:
1 — подвижный палец; 2 — накладки; 3 — неподвижный палец

Там, где необходимо захватывать плотно закрепленные детали, можно использовать захват с двумя подвижными пальцами, действующими синхронно. Движение пальцев может быть поступательным или вращательным. Использование захватов с вращающимися (поворачивающимися) пальцами ограничено, так как их конструкция должна соответствовать форме детали и обеспечивать определенное угловое положение пальцев в точках контакта. Захваты с поступательно прямолинейно перемещающимися (параллельными) пальцами таких ограничений не имеют и могут успешно применяться для переноса деталей в широком диапазоне размеров. Используя V-образные накладки на пальцах, можно добиться захватывания неточно размещенных деталей. При захватывании плотно зажатых деталей (например, при разгрузке токарного станка) пальцы в разомкнутом положении подводятся к детали (с некоторым зазором), а затем одновременно смыкаются на ней.

Некоторые механические захватные приспособления имеют три пальца. Это особенно удобно для транспортировки деталей цилиндрической формы, так как три точки контакта гарантируют расположение круглой детали вдоль оси симметрии захвата. Поэтому подобные центрующие захваты успешно используются для загрузки круглых деталей в зажимные патроны и оправки. Другие механические захваты имеют четыре подвижных, одновременно смыкающихся пальца, обеспечивающих правильное расположение детали прямоугольной формы относительно оси симметрии захвата.

У большинства описанных захватов положение пальцев может быть изменено так, чтобы захватывать деталь за внутренние поверхности.

28.6. Общие требования к конструкции рабочего органа

Хотя рабочие органы роботов сильно различаются по назначению, сложности и сфере применения, существуют определенные требования, относящиеся практически ко всем их видам. В данном разделе изложены эти основные положения.

Рабочий орган должен быть по возможности легким. Его масса сильно влияет на работу робота. Значение предельной нагрузки, т. е. массы, которая может быть закреплена на присоединительном фланце манипулятора, включает в себя массу рабочего органа. Величина нагрузки влияет на скорость перемещения (при малых нагрузках робот может двигаться быстрее). Это важно с точки зрения длительности цикла работы: чем легче инструмент, тем с большей скоростью может перемещаться робот. Обычно для снижения массы используют легкие материалы (алюминий, магний) и везде, где это возможно, делают выборку лишнего материала.

Рабочий орган должен иметь как можно меньшие габариты. Уменьшение размеров рабочего органа помогает снизить его массу. Уменьшение габаритов экономит рабочее пространство роботизированной ячейки. Что касается робота, то расчет его предельной нагрузки связан с вычислением момента инерции последнего звена манипулятора, т. е. определенной нагрузки, находящейся на определенном расстоянии от поверхности присоединительного фланца. Поэтому, чем меньше габариты рабочего органа и чем ближе к присоединительному фланцу находится его центр тяжести, тем лучше рабочие характеристики робота.

Желательно, чтобы рабочий орган мог использоваться для работы с различными деталями. Это уменьшит потребность в его смене и снизит затраты на приобретение оснастки. Хотя уменьшение габаритов рабочего органа в какой-то мере сужает диапазон размеров удерживаемых деталей, существуют методы, позволяющие удовлетворить оба эти требования. В конструкции рабочего органа можно предусмотреть возможность быстрой ручной перенастройки на детали разных размеров. Для перехода от деталей одного размера и формы к другим можно использовать сменные вкладыши и накладки. Возможна и автоматическая смена захватов или инструментов в соответствии с классом обрабатываемых деталей, причем каждый из сменных рабочих органов обеспечивает работу с определенной частью деталей из всего диапазона. Такое решение уменьшает массу и габариты и сокращает количество рабочих органов.

Следующее требование к конструкции рабочего органа — максимальная жесткость. Она во многом определяет рабочие характеристики робота. Роботы обеспечивают определенную точность повторного позиционирования и захватывания деталей. При недостаточной жесткости рабочего органа возрастает погрешность позиционирования. При малой точности изготовления деталей это может привести к резкому снижению надежности выполняемой операции. Закрепление нежесткой или непрочной оснастки на присоединительном фланце может вызвать чрезмерную вибрацию. А поскольку роботы могут перемещать рабочий орган с большой скоростью, такая вибрация может повлечь за собой повреждение или разрушение рабочего органа. Использование жестких конструкций позволяет избежать вибраций.

Конструкция рабочего органа должна обеспечивать максимальное усилие сжатия. Это особенно важно из соображений безопасности. Роботы могут очень быстро перемещать манипулятор, и только усилие сжатия и сила трения удерживают деталь в захвате. Обычно деталь поворачивают вокруг оси робота, и при этом возникают центробежные силы. При перемещении от одной точки к другой на рабочий орган действуют силы, вызванные ускорением и торможением манипулятора. Очень сложно предусмотреть в конструкции рабочего органа усилие сжатия, гарантирующее, что во время транспортировки деталь будет надежно удерживаться захватом, а не вылетит из него, как пуля, и не травмирует (или убьет) кого-нибудь из находящихся в рабочей зоне или не повредит периферийное оборудование. С другой стороны, прикладываемое усилие не должно быть столь велико, чтобы вызывать деформацию или разрушение более хрупких деталей. И еще одно важное соображение, касающееся ориентации детали при ее переносе. Если во время переноса детали ось захвата параллельна полу, то деталь, удерживаемая только трением между пальцами и ее поверхностью, может выскользнуть из захвата, особенно в точках останова. Повернув захват так, чтобы его ось была перпендикулярна к полу, можно уменьшить требуемое усилие сжатия и увеличить скорость перемещения, так как в этом случае сам захват ограничивает возможное смещение детали.

При разработке оснастки следует учитывать удобство ее технического обслуживания и замены. Необходимо предусмотреть возможность быстрой замены непрочных и изнашиваемых элементов конструкции,

а также сменных деталей (наладок, вкладышей, пальцев). В конструкции рабочего органа по возможности следует использовать один и тот же тип крепежных деталей — это уменьшит число инструментов, требуемых для ее технического обслуживания.

28.7. Основные требования к рабочему органу

Как уже упоминалось, разработка концепции рабочего органа и его конструкции проводится только после того, как завершен тщательный анализ детали и технологического процесса. Работа проводится в два этапа. Первый — подготовительный, или этап сбора информации, второй — этап разработки конструкции. Подготовительный этап включает анализ изделия и технологии в аспекте рабочих характеристик, второй этап — собственно конструирование рабочего органа в соответствии с требованиями, выработанными на первом этапе.

28.7.1. Подготовительный этап проектирования

Анализ изделия. Для определения основных параметров рабочего органа проводится анализ детали, которую необходимо обработать или перенести. Конструкция рабочего органа зависит от размеров и допусков на размеры детали. Размеры детали определяют габариты и массу рабочего органа, необходимость сменных пальцев и вкладышей, возможность замены инструмента и обработки деталей в некотором диапазоне размеров. От погрешностей размеров детали зависит необходимость обеспечения податливости оснастки. Податливость создается за счет упругой подвески рабочего органа к присоединительному фланцу робота, компенсирующей возможные ошибки позиционирования, обнаруживающиеся при совмещении собираемых деталей или установке детали в зажим или технологическое оборудование. Если отклонения в размерах детали таковы, что ее установка в зажим производится с меньшей точностью, чем точность повторного позиционирования робота, то можно предусмотреть согласующее устройство. Эти устройства бывают двух типов: пассивной и активной податливости. Одни устройства пассивной податливости (например, пружины) вводятся в конструкцию рабочих органов и используются при малых значениях возможных отклонений. Они уменьшают жесткость оснастки. Другие устройства пассивной податливости (такие, как устройство податливости с удаленным центром) производятся серийно и монтируются между присоединительным фланцем робота и рабочим органом. Они компенсируют отклонения по различным осям и предназначены, в первую очередь, для использования в сборочных системах. С их помощью обеспечивается очень высокая точность сборки, выше, чем предельная точность повторного позиционирования робота. Для тех же целей могут быть использованы и устройства активной податливости с сенсорной обратной связью.

Материал и физические свойства детали также влияют на конструкцию оснастки. На основании их анализа определяются: тип захвата (вакуумный, магнитный или механический); максимально допустимое усилие сжатия; расположение и количество точек контакта захвата с деталью, обеспечивающее удерживание детали во время ее переноса; необходимость датчиков, управляющих прикладываемой силой сжатия.

На основании анализа массы и положения центра тяжести детали определяются количество и положение точек контакта, обеспечивающее перенос детали; решается вопрос о необходимости противовеса или дополнительных точек опоры на поверхности детали (кроме точек контакта с захватом). Статическая и динамическая нагрузки и моменты инерции детали и оснастки относительно присоединительного фланца робота согласуются с рабочими характеристиками робота.

Анализ чистоты поверхности и формы детали необходим для уточнения типа захвата (например, вакуумный для гладких плоских поверхностей или механический для круглых деталей и т. д.). Если деталь имеет очень сложную форму, то следует использовать комбинацию двух или более независимых захватных устройств. Они могут быть смонтированы отдельно и захватывать различные участки детали. Это может быть комбинация вакуумных присосов, магнитов и(или) механических захватов. Если два устройства имеют общий привод, необходимо предусмотреть соответствующие соединения.

Необходимо рассмотреть вопрос о возможности модификации изделия, которая не повлияла бы на его функции, но позволила бы уменьшить себестоимость и сложность оснастки. Обычно такие небольшие изменения, как отверстия или выступы на детали могут значительно упростить конструкцию рабочего органа и вместе с тем направляют усилия конструктора на разработку деталей, удобных для автоматического изготовления и роботизированной сборки.

Анализ погрешностей изготовления детали проводится для определения необходимости введения датчиков, регистрирующих отклонения, превышающие допустимые значения, а также устройств, компенсирующих такие отклонения.

В том случае, когда необходимо удерживать не деталь, а инструмент, анализ детали проводится для определения основных характеристик инструмента. Это особенно важно для разработки встроенных датчиков для защиты инструмента от повреждения из-за погрешностей изготовления детали.

Анализ технологического процесса. Наряду с тщательным анализом изделия для определения оптимальных параметров оснастки необходимо провести и анализ процесса его обработки.

Сначала анализируется метод обработки, и здесь важно сравнить выполнение операции вручную и с использованием робота. Во многих случаях работа, выполняемая человеком, может быть выполнена и роботом, но несколько другим способом. Это связано с тем, что робот лишен физических ограничений, присущих человеку. Хорошей иллюстрацией тому может служить решение вопроса: что лучше — взять инструмент и обрабатывать им детали или взять деталь и поднести ее к инструменту. Для человека выбор часто определяется физическими возможностями, и он вынужден брать в руки то, что меньше и легче. В одном случае это — деталь, в другом — инструмент. Для робота, имеющего гораздо большие габариты и грузоподъемность, эти соображения не влияют на решение вопроса. Поэтому его можно использовать для переноса крупной детали к неподвижному инструменту или же снабжать целым набором инструментов для обработки детали. Это может повысить эффективность выполнения операции за счет уменьшения длительности цикла, повышения качества и производительности работы. Поэтому при анализе технологического процесса необходимо решить вопрос, что же эффективнее: подносить детали к инструменту или инструмент к детали. Транспортировка детали к инструменту лучше тем, что не приходится заботиться о кабеле, подводящем энергию к инструменту: в этом случае он подвержен меньшим изгибам и функционирует надежнее, чем при подвижном инструменте.

Благодаря большой грузоподъемности, робот может оснащаться многофункциональными рабочими органами. Такая оснастка позволяет одновременно или последовательно выполнять несколько операций обработки детали; человеку же для этого нужно по очереди брать разные инструменты, что снижает производительность труда. Например, робот, разгружающий машину для литья в постоянные формы, может не только брать деталь, но и опрыскивать смазочным материалом поверхности пресс-формы.

Необходимо проанализировать набор и количество деталей или инструментов, используемых в производственном процессе, и разработать требования к рабочему органу. На основании этих требований решается вопрос о необходимом количестве захватов или инструментов. Для работы с деталями разных размеров замена захвата производится либо автоматически, либо вручную. Вручную может проводиться настройка оснастки на нужный размер детали, замена пальцев или вкладышей захвата, а также смена инструмента в общем держателе. Для ускорения замены нужно предусмотреть удобные средства разъединения и совмещения (установочные штифты и отверстия). При автоматической замене инструмента предусматриваются механические средства обеспечения правильности установки (например, конические штифты и втулки), а также контрольные датчики, встраиваемые в оснастку.

Возможные изменения расположения и ориентации детали в процессе ее обработки также влияют на конструкцию оснастки. Положением и ориентацией детали во время ее захватывания и высвобождения определяется: возможное число точек контакта захвата с деталью; величина зазора, обеспечивающего захват детали; требования к движениям рабочего органа; силы и моменты инерции рабочего органа и детали относительно присоединительного фланца робота; необходимость датчиков положения и ориентации детали; сложность рабочего органа.

Последовательность действий и требования к длительности цикла непосредственно влияют на сложность конструкции рабочего органа. Требования к длительности цикла определяют количество инструментов (или захватов). Использование устройств, захватывающих сразу несколько деталей, часто позволяет повысить производительность труда в сравнении с ручным. Требования к последовательности действий также могут сделать необходимым применение многофункциональной оснастки, выполняющей несколько операций за один цикл. Так, например, при обслуживании машин для литья, рабочий орган не только захватывает деталь, но и опрыскивает смазочным материалом литейные формы или пресс-формы. Рабочий орган может одновременно держать и обрабатывать деталь, проводить автоматическую калибровку и сверление отверстия. Анализ последовательности действий может показать, что для выполнения операций раз-

личными элементами системы необходимо обеспечить дополнительные степени подвижности детали или инструмента за счет конструкции рабочего органа.

Необходимость контроля за течением процесса обработки детали также влияет на конструкцию рабочего органа. Ею определяются требования к управлению рабочим органом, к датчикам и измерительным приспособлениям, входящим в его конструкцию, местоположение контакта инструмента и детали, а также точность позиционирования детали.

Условия обработки детали могут потребовать включения в рабочий орган нескольких датчиков и обеспечения независимой работы устройств с несколькими захватами.

На конструкцию рабочего органа влияют и внешние условия. Необходимо оценить возможные воздействия температуры, влажности, содержащихся в воздухе загрязнений, а также действие кислот и щелочей, вибраций и ударов. По результатам проведенной оценки делается выбор материалов оснастки, привода, датчиков, механических соединений и, если это необходимо, защитных приспособлений.

28.8. Заключение

28.8.1. Советы по проектированию рабочего органа

В приведенном ниже списке даны некоторые советы, которые могут оказаться полезными при разработке рабочего органа (РО).

Конструкция РО должна обеспечивать возможность быстрой замены, полной или входящих в него компонентов с применением минимального числа инструментов (гаечных ключей, отверток и т. д.).

Следует использовать одинаковые крепежные изделия.

Необходимо предусмотреть направляющие штыри, шпоночные канавки или риски, облегчающие замену, точную установку и совмещение деталей.

Не следует использовать в конструкции элементы с острыми кромками и углами; это предупредит истирание и перерезание кабелей и шлангов, а также уменьшит вероятность травм.

Допустимое изгибание кабелей и шлангов должно обеспечивать возможность предельных перемещений манипулятора по всем осям.

Следует по возможности использовать легкие материалы или предусматривать отверстия и полости для облегчения конструкции.

Для защиты от износа следует предусмотреть твердое покрытие легких материалов и использовать закаленные резьбовые накладки для мягких материалов.

Рекомендуется разработать и сравнить несколько вариантов конструкции РО.

Не следует экономить на мелочах, чтобы не проиграть в большем. Для разработки действительно эффективного и надежного РО требуется затратить определенные средства и приложить немалые усилия.

В случае необходимости конструкция РО должна обеспечивать дополнительные степени подвижности захвата или инструмента.

Необходимо предусмотреть датчики, контролирующие фиксацию детали во время переноса (концевой выключатель, дальномерный датчик, пневмоструйный датчик).

Следует проанализировать реакцию РО на случайное отключение силового питания и предусмотреть средства, обеспечивающие безопасность (захват с запорным приспособлением или стопорный клапан).

Для защиты наиболее дорогостоящих элементов РО и уменьшения времени простоя следует предусмотреть срезающиеся штифты или поверхности.

В случаях, когда робот держит инструмент, следует встроить средства контроля состояния инструмента либо в РО, либо во вспомогательное оборудование.

Следует обеспечить многофункциональность РО.

Необходимо предусмотреть удобство технического обслуживания и быстрой замены изношенных деталей.

Рекомендуется использовать в конструкции РО подшипники с уплотнением.

Следует предусмотреть сменные вкладыши или пальцы для работы с деталями разных размеров.

Если робот должен удерживать горячие детали, то следует предусмотреть теплоотвод или экран для защиты РО и робота.

Приводы и клапаны для РО следует монтировать на предплечье робота.

В случае необходимости следует встроить в РО устройство совмещения или зажимное приспособление.

Для определения состояния РО («открыто», «закрыто» и др.) в него необходимо встроить специальные датчики.

При разработке РО следует учитывать силы инерции, положение центра тяжести при предельной нагрузке, центробежные силы и другие динамические параметры.

Необходимо предусмотреть требования к перемещению детали во время ее захватывания (захват с одним подвижным пальцем должен развивать достаточное усилие для смещения детали в одном направлении, захват с тремя и четырьмя пальцами — в нескольких).

При использовании в конструкции захвата электромагнита, необходимо учесть возможность остаточного намагничивания детали и прилипания стружки.

При использовании захвата с вакуумными присосами для транспортировки замасленных деталей высвобождение детали из захвата требует дополнительного наддува.

При использовании РО для сборки следует проанализировать усилия, развиваемые роботом по различным осям.

Необходимо обеспечить сохранение ориентации детали в РО либо за счет усилия сжатия и сил трения, либо путем применения специальных средств (например, стопоров).

28.8.2. Перспективы развития рабочих органов

В настоящее время в большинстве областей применения промышленных роботов используются специально сконструированные рабочие органы или захваты. Вместе с тем делаются попытки разработать более гибкие многоцелевые захваты, которые могли бы работать с деталями различной формы и размеров. Однако от копирования человеческой руки уже отказались. Встраивание в рабочие органы датчиков обратной связи (очувствление) позволяет использовать роботы для выполнения все более сложных работ. Эта тенденция в развитии роботов, по-видимому, сохранится и в дальнейшем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lundstrom, G., Glennie, B., and Rooks, B. W.. *Industrial Robots Gripper Review*, IFS Publications, Bedford, England, 1977.
2. Okada, T. and Tsuchiya, S., On a versatile finger system, *Proceedings of the 7th International Symposium on Industrial Robots*, Tokyo, Japan, October 1977, pp. 345—352.
3. Mori, K. and Sugiyama, K., Material handling device for irregularly shaped heavy works, *Proceedings of the 8th International Symposium on Industrial Robots*, Stuttgart, West Germany, May 1978, pp. 504—513.
4. Van der Loos, H., Design of three-fingered robot gripper, *Industrial Robot*, Vol. 5, No. 4, December 1978, pp. 179—182.
5. Chelponov, I. B. and Kolpashnikov, S. N., Mechanical features of gripper in industrial robots, *Proceedings of the 13th International Symposium on Industrial Robots*, Chicago, Illinois, April 1983, pp. 18.77—90.

Глава 29
СТРАТЕГИЯ РОБОТИЗАЦИИ

Ф. А. Циэмпа, фирма «Форд», г. Диаборн, шт. Мичиган

29.1. Введение

В настоящей главе описано развитие робототехники в тяжелой промышленности. Оно началось в начале 60-х годов с создания универсального транспортного устройства. В начале 70-х годов появилось первое предприятие по сборке автомобилей, использовавшее роботы. В главе рассмотрен и конец 70-х годов, когда в ответ на вызов, брошенный зарубежными компаниями, фирме «Форд» пришлось разрабатывать стратегию, ведущую к существенному росту производительности и повышению качества продукции.

В главе подробно изложены основные положения стратегии Центра по использованию роботов фирмы «Форд», направленной на распространение информации о роботах и на создание условий, при которых технолог был бы в курсе всех последних достижений быстро развивающейся робототехники. Центр оказывает помощь при разработке роботизированных систем (робот, оснастка рабочих органов, датчики, транспортные устройства и т. п.). Таким образом, Центр содействует разрешению проблем использования роботизированных систем на производстве.

В главе изложены планы фирмы на 90-е годы и определены основные требования к развитию современной робототехники: что требуется от поставщиков роботов для облегчения использования, упрощения тех-

нического обслуживания и расширения сферы применения их продукции.

29.2. История развития

Использование роботов в фирме «Форд» началось в августе 1961 г. с установки на заводе в г. Кэнтон Фордж робота модели «Версатран» для загрузки пресса. Это был первый опыт применения роботов в фирме «Форд» и один из первых — в автомобилестроительной промышленности Америки. В то время роботы называли «универсальными транспортными устройствами». Такой термин был использован для того, чтобы избежать производственных конфликтов, связанных с нежеланием некоторой части рабочих иметь дело не просто с технологической оснасткой, а с механическими устройствами, призванными заменить людей.

К концу 1973 г. на предприятиях фирмы «Форд», расположенных по всему миру было установлено 66 роботов, причем 33 из них — на сборочном предприятии в г. Канзас-Сити, шт. Миссури, где роботы выполняли точечную сварку автомобилей марок «Форд-Маверик» и «Форд-Комет». В течение последующего десятилетия это предприятие оставалось ведущим по использованию роботов. В то время применялись в основном роботы модели «Юнимейт-4000» и «Версатран». Тогда их использовали преимущественно для точечной сварки и загрузки и разгрузки прессов.

В марте 1973 г. фирмы «Юнимейшн» и «Форд» предприняли совместную разработку программируемой автоматизированной системы. Эта система — предшественница современных робототехнических комплексов — была меньше и работала быстрее и с гораздо более высокой точностью, нежели роботы того времени; она обеспечивала точность повторного позиционирования 0,0025 мм вместо обычных 0,0127 мм. Система состояла из двух роботов для сборки малогабаритных изделий. Для перехода на сборку других изделий требовалось только изменить программу и элементы оснастки. Таким образом, была доказана возможность сборки мелких изделий с применением нескольких роботов, запястья которых перемещались с недостижимой ранее точностью. Эта концепция впоследствии широко использовалась, и в этом состоит основное значение созданной системы, несмотря на то что она не использовалась в производстве.

Через некоторое время из материалов семинаров и последних публикаций стало очевидно, что термины «робот» или «промышленный робот» были приняты и специалистами, и общественностью. В 1980 г. в фирме «Форд» также перестали использовать сочетание «универсальное транспортное устройство», заменив его на «робот» и «промышленный робот». К 1983 г. на предприятиях этой фирмы работало уже 1100 роботов. Область их применения значительно расширилась и теперь включала выполнение следующих операций: дуговая сварка; загрузка и разгрузка палет; загрузка и разгрузка станков; удаление заусенцев; сборка; окраска распылением; нанесение покрытий и клейких веществ; считывание полоскового кода при помощи лазерного устройства. Во многих случаях для определения положения и ориентации детали применялись волоконная оптика, фотоэлементы, инфракрасные датчики и системы технического зрения. Несмотря на большие успехи роботизации руководство фирмы понимало, что мировая конкурентная борьба требует дальнейшего развития. Этим диктовалась необходимость дополнительных усилий для внедрения более совершенных систем. Вместе с тем остро встал вопрос об упрощении их эксплуатации, поскольку рабочие на предприятиях не имели соответствующей подготовки.

29.3. Стратегия

В настоящее время фирма «Форд» вступила в новую эпоху автомобилестроения, эпоху, обещающую как серьезные трудности, так и широкие перспективы. Конкуренция становится все жестче, а покупатели автомобилей — все взыскательней. Чтобы добиться успеха, руководство фирмы решило продолжить разработку и выпуск продукции с использованием последних достижений в технологии, обеспечивающих прочность, высокое качество и надежность изделий при минимально возможной цене.

Чтобы выстоять в конкурентной борьбе 80-х годов необходимо достичь существенного повышения производительности и качества продукции. Опыт показывает, что внедрение новейших технологий в значительной мере способствует повышению производительности. Предполагается, что автоматизация и в особенности использование роботизированных систем обеспечат развитие в наиболее перспективном направлении. Но для этого необходимо внедрять средства роботизации и автоматизации на предприятиях фирмы.

Существует несколько причин, по которым такая мощная фирма, как «Форд», вынуждена проводить специальную программу роботизации производства.

Координация деятельности. «Форд» — это большая транснациональная корпорация,

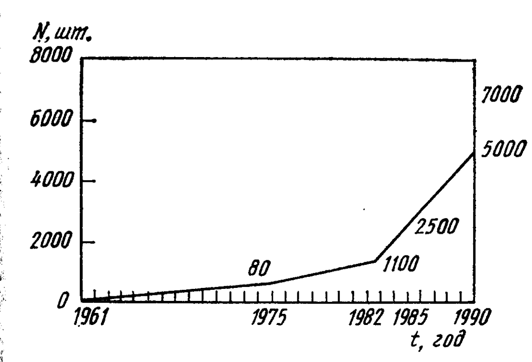


Рис. 29.1. Рост числа роботов, установленных на предприятиях фирмы «Форд»

имеющая предприятия и филиалы во многих странах мира. Поэтому возникла необходимость обеспечить эффективный взаимный обмен опытом роботизации между всеми ее отделениями. Для удержания позиций на мировом рынке нужно организовать распространение передового опыта и знаний, связанных с успешным внедрением роботов.

Внедрение новых разработок. Необходимо, чтобы специалисты, занятые планированием и подготовкой производства, были в курсе достижений этой сравнительно быстро развивающейся и высокопроизводительной отрасли. Ее развитие выражается в увеличении количества и усложнении программных и технических средств, а также в увеличении числа фирм — поставщиков оборудования.

Модернизация оборудования. Всего несколько лет назад количество фирм, выпускающих роботы, и число серийных моделей роботов было невелико. Сегодня же только в США таких фирм насчитывается более 30, а если учитывать Европу и Японию, то это число приблизится к 120.

Ускорение роботизации. В настоящее время на предприятиях фирмы «Форд» работает 1100 роботов, а к 1985 г., по самым скромным подсчетам, их планируется уже 2500 (рис. 29.1), т. е. за относительно небольшой промежуток времени число роботов увеличится на 125 %. Для того, чтобы правильно выбрать оборудование, необходима специальная методика.

Ориентация на развитие технологии. Для ускорения внедрения новейших технологий в производстве и сборке изделий также необходим организованный подход. Сложилось так, что более 80 % средств, отпускаемых фирмой на перспективные разработки и исследования, шло на разработку новых изделий.

В декабре 1982 г. для координации работ по роботизации был создан Консультационный центр по роботизации и автоматизации. Центр призван выполнять следующие функции: внедрение новых технологий; разработку промышленных систем на базе современной вычислительной техники; обучение персонала; содействие в разработке роботизированных систем; оценку качества и работоспособности оборудования.

29.3.1. Внедрение новых технологий

Решение всех задач модернизации производства — внедрение роботов и программируемых средств автоматизации, оптимальный выбор роботов и разработка вспомогательных технологических систем, конструирование рабочих органов роботов и создание программного обеспечения — все было возложено на технологов-производственников. Вообще-то, они располагали достаточными знаниями в области робототехники и применения ЭВМ, но им пришлось потрудиться, осваивая новейшие достижения в этих отраслях.

Это и побудило руководство фирмы организовать в штате Центра по роботизации новую группу специалистов-консультантов по внедрению промышленных технологий. В группу вошли сотрудники фирмы с большим инженерным и производственным опытом, работавшие в области операций изготовления и сборки. Их первоочередная задача — следить за появлением новых технологий и оценивать их возможности, а также оказывать помощь технологам-производственникам в проектировании и внедрении промышленных систем.

29.3.2. Промышленные системы на базе современной вычислительной техники

В дополнение к группе консультантов по внедрению промышленных технологий была организована еще одна группа, скоординировавшая деятельность сотрудников, уже занимавшихся вопросами разработки промышленных систем с использованием вычислительной техники. Группа разрабатывает методики программирования, редактирования и программной диагностики неисправностей роботизированных систем.

29.3.3. Обучение персонала и отношение к роботизации

В процесс обучения и повышения квалификации вовлечены все сотрудники фирмы — рабочие, служащие и руководя-

щие работники. Заблаговременная подготовка кадров, предшествующая внедрению роботов в подразделениях, помогает разрушить психологический барьер, связанный со страхом неизвестного — в данном случае этим неизвестным является робот. Это помогает изменить к лучшему отношение рабочих к роботизации. Во время обучения рабочие знакомятся с применением роботов, составлением программ, эксплуатацией и техническим обслуживанием роботов и вспомогательного оборудования. В курс подготовки включен просмотр видеозаписей, слайдов, кинофильмов и практическое освоение различных роботов. Кроме того, разработчики роботов поставляют учебные видеопрограммы для пользователей.

29.3.4. Содействие в разработке роботизированных систем

В центре по роботизации технологам-производственникам, работающим на обрабатывающих и сборочных предприятиях фирмы «Форд», предоставляются все средства для проведения лабораторных исследований. С их помощью технологи могут уточнить стратегию разработки роботизированной системы, особенно в случае каких-либо затруднений. В Центре можно проводить исследования разрабатываемой системы в условиях, воспроизводящих производство. Это дает возможность еще до закупки оборудования, предусматриваемого проектом системы, провести отработку общей концепции, упростить систему и сделать ее работоспособной, разрешить большинство проблем, определить длительность цикла и тип робота, наиболее подходящий для работы в конкретных условиях. При проведении разработки и испытания системы используется разнообразное периферийное оборудование — транспортеры, различные рабочие органы и захваты, зажимные приспособления и датчики, механизмы для транспортировки и подачи — все, что необходимо для моделирования конкретного приложения.

Такая постановка дела позволяет технологу пересмотреть и упростить первоначальный замысел, воплотить свою идею в эффективно работающую роботизированную систему. Это избавляет технолога от желания «все сделать иначе», как бывает в случае, когда предварительные испытания проходят уже после того, как закуплено все оборудование. Технолог может определить действительную длительность цикла и упростить конструкцию оснастки, отработать подачу изделия к роботу еще до его приобретения. Тем самым снимаются основные трудности, возникающие при внедрении роботов. Эти трудности главным образом связаны с рабочим органом робота и периферийным оборудованием: малые точность повторного позиционирования и надежность подачи изделия к роботу; малые точность повторного позиционирования и надежность рабочего органа при выполнении операций сборки; низкая надежность зажимных приспособлений при загрузке станков. Эти проблемы вызываются жестким ограничением длительности цикла и необходимостью каждый раз разрабатывать новую, уникальной конструкции оснастку и периферийное оборудование. Благодаря проводимой фирмой деятельности по совершенствованию использования роботов, технологи могут на практике испытать разрабатываемую систему и проверить ее работоспособность и долговечность. Выявленные недостатки могут быть устранены, что позволяет завершить разработку действительно эффективно работающей роботизированной системы до установки оборудования в цехе, когда на доработку системы уже просто не хватает времени.

За первые восемь месяцев существования Центра было разработано приблизительно 20 роботизированных систем. Технологи, занимавшиеся этими разработками, с большим энтузиазмом отнеслись к возможности проверить и доработать систему до окончательного ее воплощения. Однако прошло слишком мало времени, чтобы утверждать, что разработки, сделанные в Центре, проверены и одобрены в условиях производства.

29.3.5. Оценка качества и работоспособности оборудования

Одной из задач Центра является оценка возможностей появляющегося на рынке нового робототехнического оборудования. Сотрудники Центра занимаются также оценкой работоспособности и измерением рабочих характеристик имеющегося в распоряжении фирмы оборудования с целью сбора данных о его работоспособности в конкретных условиях. Методика оценки аналогична описанной в гл. 10. Исследуются обеспечиваемая точность повторного позиционирования, энергопотребление, а также характеристики надежности при различных предельных нагрузках, скоростях и радиусах действия. Это необходимо для документального подтверждения претензий к изготовителю и для разработки базы данных рабочих характеристик роботов различных моделей. Такая база данных позволяет разработчикам правильно выбирать оборудование для каждого конкретного приложения.

Согласно используемой методике проводится оценка влияния массы нагрузки, скорости и радиуса действия на точность позиционирования и повторного позиционирования. Точность позиционирования определяется как разница между фактическим положением рабочего органа робота и положением, заданным при обучении. Точностью повторного позиционирования называют разброс положения рабочего органа при выполнении повторяющихся движений. Хотя с помощью методики, разработанной в Центре по роботизации фирмы «Форд», измеряются и точность позиционирования, и точность повторного позиционирования, для оценки влияния динамических параметров важнее все же точность повторного позиционирования. Скорость ускорение, торможение, масса оснастки и нагрузки и их расположение относительно запястья робота — вот лишь некоторые из параметров, влияющих на динамические характеристики роботов.

Измерение точности повторного позиционирования проводится для статистической оценки возможностей системы. Предназначенное для этих целей оборудование обеспечивает определение положения рабочего органа в трех проекциях. Измерение выполняется бесконтактным способом, чтобы избежать ошибок, связанных с взаимодействием измерительного блока и оснастки. Точность повторного позиционирования замеряется в двух основных режимах работы: при запуске и после прогревания, или в процессе нормального функционирования. Это позволяет определить отклонения в значениях точности повторного позиционирования для обычного режима работы, с учетом вероятности того, что предусмотренное изготовителем робота прогревание оборудования не выполнялось.

Измерение точности повторного позиционирования проводится при двух значениях нагрузки — максимальном и среднем (50 %). И в том, и в другом случае меняют радиус действия и скорость. В табл. 29.1 представлена форма, по которой проводятся измерения. Результаты замеров обрабатывают и представляют в следующем виде:

координаты середины объема повторного позиционирования X;

габариты объема повторного позиционирования R;

нижнее и верхнее значения среднеквадратичного отклонения 3σ.

29.1. Форма проведения измерений

Нагрузка	Переменная	
	Радиус действия	Скорость
робот	max	max
номинальная	50%	max
максимальная	50%	50%
расчетная	max	50%
робот	max	max
номинальная	50%	50%
средняя (50 %)	50%	50%
расчетная	max	50%

29.4. Перспективы развития робототехники в фирме «Форд»

Как уже упоминалось, к концу 1985 г. на предприятиях фирмы «Форд» планировалось установить приблизительно 2500 роботов, т. е. на 125 % больше, чем в 1983 г., а к 1990 г. это число предположительно удвоится. С учетом того, что специалисты предприятий все лучше осваивают роботизированные технологии, возможно, к 1990 г. будет запланировано внедрение даже большего числа роботов — до 7500. Предполагается, что применение роботов распространится и на такие области, как специальные автоматические устройства и гибкие технологические ячейки. Это приведет к дальнейшему повышению производительности и качества продукции, что отвечает поставленной руководством фирмы цели — создать самый лучший и самый дешевый автомобиль. Успех этого предприятия в большой степени зависит от поставщиков промышленных роботов и разработки усовершенствованных перспективных моделей автомобилей.

29.5. Требования промышленности к робототехнике

Отсутствие единообразия в структуре, конструкции узлов и функционировании роботов — вот вопрос, на который поставщикам роботов следовало бы обратить пристальное внимание. Робототехническая промышленность выпускает много хорошей техники, но это многообразие создает затруднения пользователям. Установка на одном предприятии различных по типу, непохожих устройств усложняет их эксплуатацию — большую роль играют различия в программных средствах, рабочих характе-

ристиках оборудования, разнородность роботизированных систем.

Необходимо, чтобы производители роботов изменили свою стратегию сбыта и приняли участие в совместной разработке стандартов на конструкции роботизированных систем, которые наиболее полно отвечали бы нуждам пользователей. Унификация режимов обучения, использование единой символики и одинаковой конструкции присоединительных частей инструментов и захватов никоим образом не затронут коммерческие интересы изготовителей роботов. Отличие любого робота от уже имеющихся на предприятии, уникальность его элементов являются скорее препятствием для его приобретения. Прежде всего пользователя интересует вопрос: насколько хорошо будет работать конкретная система? Во-вторых, насколько прибыльным может быть ее использование? И, в-третьих, насколько квалификация, необходимая для эксплуатации и технического обслуживания системы, соответствует уровню подготовки сотрудников предприятия?

Благодарности. Мне хотелось бы выразить признательность всем сотрудникам Консультационного центра по роботизации и автоматизации фирмы «Форд» за создание благоприятных условий для написания настоящей главы во время совместной работы над различными программами внедрения роботизированных систем. Особо хотелось бы поблагодарить Диллона, директора Центра, представившего мне возможность ознакомиться со всеми новейшими разработками Центра в области производства. Заслуживают особой признательности Хельцерман, Михалович, Ричардс и Сицман, предоставившие в распоряжение авторов материалы и фотографии, вошедшие в настоящую главу. Мне хотелось бы особо поблагодарить Дж. Дипонио за предоставленную сотрудникам Центра возможность принять участие в составлении настоящего справочника.

СПРАВОЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Справочник по промышленной робототехнике

Книга 1

Редактор *А. С. Альшевский*
Переплет художника *С. Н. Голубева*
Художественный редактор *С. Н. Голубев*
Технические редакторы *Л. А. Макарова, Т. И. Андреева*
Корректоры *А. П. Озерова, Л. А. Ягупьева*

ИБ № 6158

Сдано в набор 15.03.89. Подписано в печать 27.07.89. Формат 70×100[1]/16. Бумага офсетная № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 39,0. Усл. кр.-отт. 78,0. Уч.-изд. л. 50,18. Тираж 20 000 экз. Заказ 101. Цена 3 р. 80 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машиностроение», 107076, Москва, Стромынский пер., 4

Ленинградская типография № 2 головное предприятие ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Государственного комитета СССР по печати. 198052, г. Ленинград, Л-52, Измайловский пр., 29.

СПИСОК КНИЖНЫХ МАГАЗИНОВ — ОПОРНЫХ ПУНКТОВ ИЗДАТЕЛЬСТВА «МАШИНОСТРОЕНИЕ»

Издательство рекомендует всем спицалистам, заинтересованным в приобретении литературы по машиностроению, обращаться в следующие книжные магазины:

480064, Алма-Ата, пр. Абая, 35, магазин «Прогресс»;

225320, Барановичи, Брестская обл., БССР, ул. Жукова, 12, корп. 1, магазин № 17 «Кругозор»;

241035, Брянск, ул. Куйбышева, 12, магазин «Техническая книга»;

400066, Волгоград, ул. Мира, 11, магазин № 1 «Техническая книга»;

603014, Горький, пр. Ленина, 3, магазин № 24 «Знание»;

341056, Жданов, Украинская ССР, пр. Ленина, 121, магазин № 80 — «Дом книги»;

233000, Каунас, Литовская ССР, Лайсвес аллея, магазин «Пажанга»;

252005, Киев, ул. Красноармейская, 51, магазин № 16 «Техническая книга»;

343901, Краматорск, Донецкая обл., УССР, пр. Мира, 7, магазин № 240 «Дом книги»;

191040, Ленинград, Пушкинская ул., 2, магазин № 5 «Техническая книга»;

103031, Москва, ул. Петровка, 15, магазин № 8 «Техника»;

220005, Минск, пр. Ленина, 48, магазин № 13 «Научно-техническая книга»;

637000, Павлодар, Казахская ССР, ул. Дзержинского, 35, магазин № 1 «Эврика»;

614039, Пермь, Комсомольский пр., 51, магазин № 12 «Техническая книга»;

620151, Свердловск, ул. К. Либкнехта, 16, магазин № 8 «Техническая книга»;

700128, Ташкент, ул. Руставели, 43, магазин № 21 «Техническая книга»;

445050, Тольятти, Куйбышевская обл., ул. Революционная, 42, «Дом книги «Факел»;

310012, Харьков, Украинская ССР, ул. Свердлова, 17, магазин № 1 «Научно-техническая литература»;

473000, Целиноград, Казахская ССР, ул. Мира, 52, магазин № 3 «Техническая книга».

Уважаемый читатель!

Для выбора книг просим Вас пользоваться аннотированным планом нашего издательства, который Вы получите в книжном магазине.

Прием Ваших заказов производится ежегодно в марте—июне всеми книжными магазинами на книги выпуска следующего года. Для этого Вам следует направить почтой или оставить в магазине заполненную открытку или гарантийное письмо, если заказчиком является Ваше предприятие.

Чтобы приобрести вышедшие или выходящие в текущем году книги советуем Вам письменно обратиться в республиканский или областной книготорг. Адреса этих организаций Вам сообщат в любом книжном магазине.

Издательство не располагает книгами для продажи, поэтому просим не высылать нам Ваши заявки.